

EFEITOS GLOBAIS DE SEGUNDA ORDEM EM EDIFÍCIOS DE BETÃO ARMADO DOTADOS DE PAREDES DE CONTRAVENTAMENTO COM ABERTURAS

CÁTIA MARLENE DUARTE PEREIRA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador: Professor Doutor Rui Manuel Carvalho Marques de Faria

JUNHO DE 2017

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2016/2017

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2016/2017 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2017*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus pais e irmã

A alegria de ver e compreender é a mais bela dádiva da natureza.

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

As próximas palavras seguem como forma de agradecimento a todas as pessoas que por diversas razões e em diferentes momentos da minha vida me acompanharam e ajudaram e, sobretudo contribuíram para a elaboração deste trabalho.

Ao Professor Doutor Rui Manuel Carvalho Marques de Faria, meu orientador, pelo apoio, pela partilha de conhecimento e pelo tempo dedicados à elaboração desta dissertação.

Aos professores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto por toda a disponibilidade demonstrada, ajuda prestada e conhecimento partilhado ao longo destes cinco anos, em especial aos professores da especialização em Estruturas.

À Daniela, Raquel e Isabel pela amizade ao longo destes últimos oito anos e em especial, pelo apoio incondicional e companheirismo demonstrado ao longo destes cinco anos.

Ao Celestino e Daniel pela amizade e partilha de bons momentos nestes últimos três anos de vida académica.

À Mariana, Sofia, Carlo, Diogo, Francisco, Manuel e Gonçalo por um primeiro semestre do quinto ano de faculdade muito gratificante.

À Sandra, Ana, Bruno, José, Pedro, amigos e colegas de faculdade, por todos os momentos vividos, e pela convivência especial que existiu durante a realização desta dissertação.

À Jacinta, Ricardo e Martim pela família que representaram no primeiro ano de faculdade

À minha madrinha pelo apoio, pela ajuda e por todas as experiências e momentos que me proporcionou.

Aos meus avós, meus segundos pais, por toda o amor e carinho partilhados, ajuda e tempo disponibilizados.

E finalmente à minha irmã e aos meus pais, que criaram todas as condições para que eu pudesse realizar este percurso académico e, me apoiaram, sempre, ao longo destes anos.

RESUMO

Os efeitos globais de segunda ordem resultam do comportamento não linear geométrico da estrutura, combinado com o comportamento não linear do material. Sabendo da complexidade que este processo envolve, o Eurocódigo 2 propõe três metodologias para o cálculo dos esforços de segunda ordem, o Método Geral, o Método da Curvatura Nominal e o Método da Rigidez Nominal, sendo que este último apresenta duas abordagens. Uma primeira, presente na secção (5.8.7.3) do documento, que se aplica a elementos isolados e à totalidade da estrutura, em que a principal consequência das ações é o momento fletor nos elementos de contraventamento e, uma segunda, mais generalista, descrita no Anexo H do Eurocódigo 2, para outros tipos de estruturas.

A metodologia exposta no Anexo H propõe a contabilização dos efeitos globais de segunda ordem através da majoração das forças horizontais aplicadas na configuração indeformada do edifício, por intermédio de um fator que podemos designar por β . O cálculo deste fator β pressupõe a determinação da carga global de encurvadura do sistema de contraventamento através da aplicação de uma expressão que envolve a flexão global, ou de outra, que também abrange o esforço transversal global. Nesse cálculo é utilizado um valor nominal da rigidez de flexão considerando os efeitos da fendilhação. Estas duas equações diferenciam-se no seu campo de aplicabilidade, uma vez que, a primeira é direcionada para sistemas de contraventamento sem deformações significativas de esforço transversal, e a segunda é vocacionada para sistemas de contraventamento com deformações significativas de esforço transversal. As deformações de esforço transversal em sistemas de contraventamento, quando estes são paredes estruturais de grande rigidez, tendem a tornar-se relevantes com a existência de aberturas, essencialmente com o aumento das suas dimensões. A presente dissertação tem como objetivo principal a determinação de uma percentagem da área das aberturas relativamente à área das paredes, a partir da qual se começa a tornar relevante considerar a influência destas aberturas comparativamente com a metodologia preconizada para paredes sem aberturas.

A determinação da carga global de encurvadura é realizada através do cálculo da carga global nominal de encurvadura para a flexão global e do cálculo da carga global de encurvadura tendo em conta a flexão e o esforço transversal globais, recorrendo às equações contidas no Anexo H do Eurocódigo 2. A carga global de encurvadura para o esforço transversal foi obtida através do programa de cálculo estrutural, *ROBOT*, assim como a carga global de encurvadura tendo em conta a flexão e o esforço transversal globais, obtendo-se para esta última, dois valores distintos. O valor da carga global de encurvadura tendo em conta a flexão e o esforço transversal globais obtido pelo programa de cálculo automático foi estabelecido como sendo o valor mais plausível para a caracterização do parâmetro físico em questão, para uma posterior comparação com os dois valores obtidos pelas equações preconizadas no Anexo H do Eurocódigo 2.

PALAVRAS-CHAVE: efeitos globais de segunda ordem, carga de encurvadura, rigidez nominal, paredes de contraventamento com aberturas, sistemas de contraventamento.

ABSTRACT

Second order effects result from the nonlinear geometric behaviour of the structure, combined with the nonlinear behaviour of the material. Knowing the complexity of this process, Eurocode 2 proposes three methodologies for the calculation of the second order effects, the General Method, the Nominal Curvature Method and the Nominal Stiffness Method, the latter of which has two approaches. The first one, present in section (5.8.7.3) of the document, which applies to isolated elements and to the entire structure, in which the main consequence of the actions is the bending moment in the bracing elements, and the second, more general, described in Annex H of Eurocode 2, for other types of structures.

The methodology presented in Annex H proposes the quantification of second order effects by increasing the horizontal forces applied in the undeformed configuration of the building, by means of a coefficient that can be designated by β . The calculation of this coefficient β presupposes the determination of the global buckling load of the bracing system through the application of an expression that involves global bending or another that also considers the global shear. In this calculation a nominal value of the flexural stiffness is used considering the effects of the cracking. These two equations differ in their field of applicability, one is used for bracing systems without significant shear deformations, and other is used for bracing systems with significant shear deformations. The shear deformations in bracing systems, if these are structural walls of high stiffness, tend to become relevant with the existence of openings, essentially with the increase of their dimensions. The main objective of this dissertation is to determine the percentage of area of the openings relative to the wall area, from which it becomes relevant to consider the influence of these openings compared to the methodology recommended for walls without openings.

The global buckling load is determined by calculating the nominal global buckling load for global bending and the global buckling load for global bending and shear using the equations contained in Annex H of the Eurocode 2. The global buckling load for the shear was obtained through the structural calculation program, ROBOT, as well as the global buckling load for global bending and shear, obtaining for the latter, two different values. The value of the global buckling load for global bending and shear obtained by the automatic calculation program was established as the most plausible value for the characterization of the physical parameter in question, for a later comparison with the two values obtained by the recommended equations in Annex H of Eurocode 2.

KEYWORDS: second order effects, buckling load, nominal stiffness, shear walls with openings, increase coefficient of horizontal forces, bracing systems.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1 Introdução.....	1
1.1. ENQUADRAMENTO DO TRABALHO.....	1
1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	3
2 Efeitos Globais De Segunda Ordem Em Edifícios De Betão Armado.....	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. QUANTIFICAÇÃO DOS EFEITOS GLOBAIS DE SEGUNDA ORDEM EM EDIFÍCIOS DOTADOS DE ELEMENTOS DE CONTRAVENTAMENTO	6
2.3. MÉTODOS DE CÁLCULO DOS EFEITOS GLOBAIS DE SEGUNDA ORDEM PRECONIZADOS PELO EUROCÓDIGO 2	8
3 Metodologia	11
3.1. INTRODUÇÃO	11
3.2. DESCRIÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO	11
3.2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	11
3.2.2. SIMULAÇÃO DAS PAREDES EM ESTUDO NO PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO ROBOT	13
3.3. PAREDES DE EDIFÍCIOS SEM ABERTURAS	21
3.4. PAREDES DE EDIFÍCIOS COM ABERTURAS.....	22
3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
4 Análise e Discussão de Resultados.....	31
4.1. INTRODUÇÃO	31
4.2. PAREDES DE EDIFÍCIOS SEM ABERTURAS	31
4.3. PAREDES DE EDIFÍCIOS COM ABERTURAS.....	33
4.3.1. PAREDES DE EDIFÍCIOS DE 6 PISOS	33
4.3.2. PAREDES DE EDIFÍCIOS DE 10 PISOS	38
4.3.3. PAREDES DE EDIFÍCIOS DE 15 PISOS	44

4.3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	50
----------------------------------	----

5 Conclusões53

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
---------------------------------	----

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	55
-------------------------------------	----

Bibliografia.....57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Definição das deformações globais e das correspondentes rigidezes: a) de flexão, $1/R$ e EI , respetivamente; b) de esforço transverso Y e S , respetivamente [1].	8
Figura 2 – Forças horizontais fictícias majoradas	9
Figura 5 – Planta do edifício	12
Figura 6 – Painéis sem aberturas: a) 6 pisos; b) 10 pisos; c) 15 pisos.	13
Figura 7 – Painéis com aberturas para paredes com 6 pisos	14
Figura 8 – Painéis com aberturas para paredes com 10 pisos	14
Figura 9 – Painéis com aberturas que simulam portas para paredes de 15 pisos	15
Figura 10 – Painéis com aberturas que simulam janelas para paredes de 15 pisos	16
Figura 11 – Painel com porta e janela de parede com 15 pisos	17
Figura 12 – Malhas de elementos finitos das paredes sem aberturas: a) parede de 15 pisos; b) parede de 10 pisos; c) parede de 6 pisos	17
Figura 13 – Malha de elementos finitos para uma parede de 10 pisos com aberturas	18
Figura 14 – Modelo da parede de 10 pisos sem aberturas para obtenção da carga global de encurvadura: a) condições de apoio; b) deformada correspondente ao primeiro modo de encurvadura.	19
Figura 15 – Modelo da parede de 10 pisos com aberturas para obtenção das cargas globais de encurvadura: a) condições de apoio; b) deformada correspondente ao primeiro modo de encurvadura; c) deformada correspondente à encurvadura por esforço transverso	20
Figura 16 – Cargas uniformemente distribuídas ao longo dos pisos de duas paredes: a) parede sem aberturas; b) parede com aberturas.	20
Figura 17 – a) Área do painel sem abertura (A); b) Área da abertura (A_0).	23
Figura 18 – Secção transversal para o cálculo do momento de inércia	28
Figura 19 – Desvio (β) para paredes sem aberturas	32
Figura 20 – Desvio 1 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 6 pisos	34
Figura 21 – Desvio 2 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 6 pisos	35
Figura 22 – Carga global de encurvadura para o esforço transversal de paredes de edifícios de 6 pisos	36
Figura 23 – Desvio 3 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 6 pisos	37
Figura 24 – Relação entre desvios ($F_{v,B}$) e desvios (β) para parede de edifícios de 6 pisos	38
Figura 25 – Desvio 1 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 10 pisos	39
Figura 26 – Desvio 2 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 10 pisos	40
Figura 27 – Carga global de encurvadura para o esforço transversal de edifícios de 10 pisos	41
Figura 28 – Desvio 3 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 10 pisos	42

Figura 29 – Relação entre os desvios ($F_{V,B}$) e os desvios (β) para paredes de edifícios de 10 pisos .	43
Figura 30 – Desvio 1 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 15 pisos	45
Figura 31 – Desvio 2 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 15 pisos	47
Figura 32 – Carga global de encurvadura para o esforço transversal para parede de edifícios de 15 pisos	47
Figura 33 – Desvio 3 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 15 pisos	49
Figura 34 – Desvio 1 (β) para paredes com aberturas de edifícios com 6, 10 e 15 pisos.....	50
Figura 35 – Desvio 2 (β) para paredes com aberturas de edifícios com 6, 10 e 15 pisos.....	51
Figura 36 – Desvio 3 (β) para paredes com aberturas de edifícios com 6, 10 e 15 pisos.....	52

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Valores característicos das cargas verticais	12
Tabela 2 – Valores de cálculo das cargas verticais	12
Tabela 3 – Propriedades físicas das paredes	21
Tabela 4 – Carga global nominal de encurvadura para a flexão global pela expressão (2.3), carga global de encurvadura pelo <i>ROBOT</i> e respetivos fatores de majoração das forças horizontais, β de paredes sem aberturas.	22
Tabela 5 – Áreas das aberturas e respetivos rácios	23
Tabela 6 – Identificação das paredes com aberturas, dimensões das aberturas e dimensões dos elementos finitos (EF) utilizadas pelo <i>ROBOT</i>	24
Tabela 7 – Rácios de áreas das paredes com aberturas, valores dos momentos de inércia utilizados na expressão (2.3), carga global de encurvadura para o esforço transversal, carga global de encurvadura pela expressão (2.3) e pela expressão (2.5) e respetivos fatores de majoração das forças horizontais.	26
Tabela 8 – Carga global de encurvadura pelo programa de cálculo estrutural, <i>ROBOT</i> e respetivo fator de majoração das forças horizontais	27
Tabela 9 – Desvio ($F_{V,BB}$) e desvio (β) para paredes sem aberturas	31
Tabela 10 – Desvio 1 ($F_{V,B}$) e desvio 1 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 6 pisos	33
Tabela 11 – Desvio 2 ($F_{V,B}$) e desvio 2 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 6 pisos	35
Tabela 12 – Desvio 3 ($F_{V,B}$) e desvio 3 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 6 pisos	36
Tabela 13 – Desvio 1 ($F_{V,B}$) e desvio 1 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 10 pisos	39
Tabela 14 – Desvio 2 ($F_{V,B}$) e desvio 2 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 10 pisos	40
Tabela 15 – Desvio 3 ($F_{V,B}$) e desvio 3 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 10 pisos	41
Tabela 16 – Desvio 1 ($F_{V,B}$) e desvio 1 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 15 pisos	44
Tabela 17 – Desvio 2 ($F_{V,B}$) e desvio 2 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 15 pisos	46
Tabela 18 – Desvio 3 ($F_{V,B}$) e desvio 3 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 15 pisos	48

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

$F_{V,BB}$ - carga global nominal de encurvadura para a flexão global [kN]

$F_{V,BS}$ - carga global de encurvadura para o esforço transverso [kN]

$F_{V,B}$ - carga global de encurvadura tendo em conta a flexão e o esforço transverso globais [kN]

β - fator de majoração das forças horizontais

E - módulo de elasticidade [GPa]

E_{cd} - módulo de elasticidade de cálculo [GPa]

g_k - valor característico da ação permanente [kN/m²]

q_k - valor característico da ação variável [kN/m²]

EC2 – Eurocódigo 2

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO DO TRABALHO

Nos últimos tempos a população mundial tem crescido de forma exponencial, fixando-se essencialmente em meio urbano. Este, por sua vez, vê-se cada vez mais densificado populacionalmente levando a um aumento expressivo da construção em altura. Desta forma, os novos edifícios tornam-se cada vez mais altos e esbeltos, ou seja a razão entre a altura e a área em planta é cada vez maior, o que implica a inclusão de novas variáveis no processo de dimensionamento dos mesmos.

Em projeto de edifícios de betão armado adota-se, numa primeira fase, um comportamento elástico da estrutura para o cálculo dos esforços instalados, obtendo-se desta forma os esforços de primeira ordem. Nestes estão incluídas as imperfeições geométricas, mas não integram a evolução da configuração da deformada devido aos efeitos de segunda ordem. Este especto apresenta grande relevância quando é necessário um estudo mais aprofundado, sobretudo quando se tratam de edifícios com uma altura considerável, ou seja, edifícios esbeltos. Surgem então, os denominados efeitos de segunda ordem que resultam do comportamento não linear geométrico combinado com o comportamento não linear do material.

Para a quantificação dos efeitos globais de segunda ordem, ao longo das últimas décadas, principalmente a partir da segunda metade do século XX, foram levados a cabo diversos estudos para a obtenção de metodologias que traduzissem com fiabilidade a realidade destes efeitos no dimensionamento de edifícios de betão armado.

O Eurocódigo 2 (EC2) é um documento utilizado em Portugal, que contém regras dirigidas para projetos de estruturas de betão armado e, nele, existem algumas indicações sobre a consideração dos efeitos globais de segunda ordem. Este código propõe três metodologias para a avaliação dos efeitos globais de segunda ordem, o Método Geral, o Método da Curvatura Nominal e o Método da Rigidez Nominal, sendo que este último apresenta duas variantes. O presente trabalho dará foco ao Método da Rigidez Nominal e, essencialmente, a uma das variantes, aquela apresentada no Anexo H do EC2, onde é feita a diferenciação entre edifícios com sistema de contraventamento sem deformações significativas de esforço transversal (a título de exemplo, paredes estruturais sem aberturas) e edifícios com sistemas de contraventamento com deformações significativas de esforço transversal (a título de exemplo, paredes estruturais com aberturas de tamanho expressivo quando comparado com a área do painel envolvente) para averiguação da necessidade da consideração dos efeitos globais de segunda ordem. Esta avaliação é feita com base nas cargas globais de encurvadura do edifício para a flexão simples e para o esforço transversal. Neste Anexo H são também apresentados métodos de cálculo dos efeitos globais de segunda ordem que propõem a majoração das forças horizontais com base na carga vertical total em elementos contraventados e de contraventamento e na carga global de encurvadura tendo em conta a flexão e o esforço transversal globais.

1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO

O EC 2 propõe duas equações para a verificação da necessidade da consideração dos efeitos globais de segunda ordem em edifícios com sistemas de contraventamento constituídos por paredes estruturais de elevada rigidez. Uma centra-se apenas na carga global nominal de encurvadura para a flexão global, enquanto que a outra se foca na carga global de encurvadura tendo em conta a flexão e o esforço transverso globais. O EC2 indica que a utilização de uma ou outra equação se baseia na relevância das deformações de esforço transversal, ou seja, a título de exemplo, a existência ou a dimensão de aberturas em paredes estruturais.

Visto que esta diferenciação não está clarificada no documento, o principal objetivo deste trabalho será a procura de um rácio entre a área da abertura e a área da parede situada entre pisos consecutivos, de forma a eliminar algumas dúvidas na utilização da metodologia aqui abordada. O segundo propósito prende-se com avaliação do realismo das equações (H.2) e (H.6) na determinação da carga global de encurvadura e suas repercussões no fator de majoração das forças horizontais, presente na expressão (H.7).

Para que os objetivos sejam alcançados com conclusões viáveis e úteis para o esclarecimento das questões expostas, o presente trabalho foi realizado nas seguintes etapas:

1. Exposição dos principais conceitos relacionados com a análise não linear das estruturas, como valores utilizados para a rigidez nominal, a obtenção da carga de encurvadura para a flexão, as equações para a quantificação dos efeitos globais de segunda ordem e fatores e suas relações que podem condicionar o significado das deformações de esforço transversal em paredes estruturais;
2. Determinação da carga global de encurvadura tendo em conta a flexão através das equações presentes no Anexo H do Eurocódigo 2;
3. Modelação de paredes estruturais com e sem aberturas no *software* de cálculo estrutural *ROBOT*, prestando atenção à malha gerada automaticamente pelo programa e ao seu refinamento;
4. Determinação da carga global de encurvadura para o esforço transversal e da carga global de encurvadura tendo em conta a flexão e o esforço transversal através do *software* de cálculo estrutural *ROBOT*;
5. Determinação dos fatores de majoração das forças horizontais para contabilização dos efeitos globais de segunda ordem, através da equação presente no Anexo H do Eurocódigo 2;
6. Cálculo de desvios entre fatores de majoração e respetiva discussão crítica.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Neste subcapítulo serão descritos, de forma resumida, os assuntos tratados ao longo dos diversos capítulos.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica de alguns pontos relacionados com o tema em estudo onde são indicados os principais conceitos relacionados com os efeitos globais de segunda ordem. São também mencionadas as condições para uma possível dispensa dos efeitos globais de segunda ordem em edifícios e métodos de cálculo dos mesmos.

No Capítulo 3 é discriminado o trabalho desenvolvido no *software* de cálculo estrutural *ROBOT*, modelos e malhas de elementos finitos para as paredes com e sem aberturas, o cálculo das cargas a que as paredes estão submetidas através dos Eurocódigo 0 e 1 e o cálculo das cargas de encurvadura pelo EC2 tendo em conta a flexão e o esforço transversal e, através do programa de cálculo estrutural. Neste capítulo são também apresentados os resultados principais obtidos após os cálculos efetuados, cargas globais de encurvadura e fatores de majoração das forças horizontais.

No Capítulo 4 são apresentados os desvios entre resultados obtidos através do cálculo analítico baseado nas equações do Anexo H do EC2 e do cálculo numérico pelo *ROBOT*, bem como possíveis correlações entre as variáveis envolvidas, discussão dos resultados obtidos e inferências sobre a validade das equações do Anexo H do EC2.

No Capítulo 5 são expostas as principais conclusões retiradas do estudo efetuado, e possíveis melhoramentos das metodologias aplicadas.

2

EFEITOS GLOBAIS DE SEGUNDA ORDEM EM EDIFÍCIOS DE BETÃO ARMADO

2.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo serão apresentados os conceitos e assuntos relacionados com os efeitos globais de segunda ordem em edifícios de betão armado, dando foco à matéria apresentada no Eurocódigo 2, nomeadamente àquela presente no Anexo H.

Num edifício de betão armado, quando se procede a uma análise estrutural para a obtenção das deformadas, das distribuições de esforços, de tensões ou de extensões são utilizados os seguintes modelos de comportamento material [1]:

- Comportamento elástico linear;
- Comportamento elástico linear com redistribuição limitada;
- Comportamento plástico, abrangendo os modelos de escoras e tirantes;
- Comportamento não linear.

Na prática corrente, numa primeira fase é realizada uma análise linear de primeira ordem, considerando o efeito das ações e das imperfeições geométricas, que correspondem ao desvio do eixo dos elementos verticais, negligenciado a influência da deformada de segunda ordem na quantificação dos esforços. Todavia, as estruturas apresentam um comportamento não linear geométrico que, aliado ao comportamento não linear do material, referente às deformações plásticas da armadura e à fendilhação do betão, originam os designados efeitos de segunda ordem. Estes prendem-se normalmente com o aumento dos momentos fletores devido à deflexão lateral em pilares esbeltos, paredes e outros elementos sujeitos a forças de compressão. O acréscimo deste tipo de esforços numa estrutura, ligados à ocorrência de deslocamentos horizontais, ocasionam um aumento das forças horizontais ao nível das componentes de contraventamento e lajes. Para o tratamento destes efeitos, na análise estrutural, são necessários processos iterativos e incrementais para a integração das ações, que possibilitam o ajustamento gradual da configuração da deformada e da rigidez estruturais.

A quantificação dos efeitos globais de segunda ordem pelo Eurocódigo 2 pode ser efetuada segundo três metodologias: Método Geral, Método da Curvatura Nominal e Método da Rigidez Nominal, dependendo do tipo de elementos ou estruturas em análise [2] [3]. Todavia, este código propõe um outro método de análise dos efeitos de segunda ordem direcionado para estruturas com paredes de contraventamento baseado no Método da Rigidez Nominal. Estas últimas permitem aumentar a rigidez do edifício e balizar os efeitos de segunda ordem, assegurando desta forma a estabilidade. O Método Geral, caracterizado por ser o mais rigoroso dos três, baseia-se numa análise não linear global do

edifício. Já os outros dois métodos apoiam-se em valores nominais para a curvatura e para a rigidez, e vocacionando-se para elementos isolados ou para sistemas estruturais.

A metodologia vocacionada para estruturas com paredes de contraventamento, recomendada pelo EC2 no anexo H, diferencia de forma não muito objetiva os sistemas estruturais em dois tipos: “sem deformações significativas de esforço transversal” e “com deformações significativas de esforço transversal”. Ou seja, apesar da distinção apresentada, não clarifica as condições ou um conjunto delas que definem ou delimitam as deformações de esforço transversal “relevantes” das “não relevantes”.

A presença de aberturas, que está intrinsecamente relacionada com a relevância das deformações de esforço transversal, altera consideravelmente a distribuição das tensões e a capacidade de carga de uma parede de contraventamento de betão armado. Assim como noutros códigos, tais como o americano e o canadiano, a influência, ou tamanho, das aberturas num elemento de contraventamento não está bem clarificada. Desta forma muitas das vezes os projetistas assemelham as paredes com aberturas a pilares ligados por vigas, fazendo desta forma o dimensionamento [1].

2.2. QUANTIFICAÇÃO DOS EFEITOS GLOBAIS DE SEGUNDA ORDEM EM EDIFÍCIOS DOTADOS DE ELEMENTOS DE CONTRAVENTAMENTO

Segundo o Eurocódigo 2, os efeitos de segunda ordem devem ser desprezados se se quantificarem em menos de 10% dos efeitos de primeira ordem correspondentes.

Segundo o EC2, os efeitos globais de segunda ordem podem ser desprezados se:

$$F_{V,Ed} \leq k_1 * \frac{ns}{ns + 1.6} * \frac{\sum E_{cd} * I_c}{L^2} \quad (2.1)$$

em que:

$F_{V,Ed}$ – carga vertical total (nos elementos contraventados e nos de contraventamento);

ns – número de pisos;

L – altura total do edifício acima do nível de encastramento;

E_{cd} – valor de cálculo do módulo de elasticidade do betão;

I_c – momento de inércia (secção de betão não fendilhada) do(s) elemento(s) de contraventamento;

$k_1=0.31$.

A expressão (2.1) pode ser aplicada se todas as condições a seguir apresentadas forem verificadas:

- “a instabilidade à torção não é condicionante, ou seja, a estrutura é razoavelmente simétrica;
- as deformações globais por corte são desprezáveis (como num sistema de contraventamento constituído, principalmente, por paredes de travamento sem grandes aberturas);
- os elementos de contraventamento estão fixos rigidamente à base, ou seja, as rotações são desprezáveis;
- a rigidez dos elementos de contraventamento é razoavelmente constante ao longo da altura;
- a carga vertical total aumenta aproximadamente a mesma quantidade por piso”[1].

No anexo H são mencionados os critérios para a dispensa dos efeitos de segunda ordem para estruturas que não cumprem estas condições, bem como são indicados métodos de cálculo para a determinação dos referidos efeitos. Na consideração, ou eventual dispensa, dos efeitos de segunda ordem o EC2 faz

uma diferenciação dos sistemas de contraventamento através da relevância das deformações de esforço transversal.

Quando as deformações de esforço transversal não possuem relevo, como em paredes estruturais sem aberturas, os efeitos globais de segunda ordem podem ser desprezados se:

$$F_{V,Ed} \leq 0.1 * F_{V,BB} \quad (2.2)$$

em que:

$F_{V,BB}$ – carga nominal de encurvadura para a flexão global.

A carga global nominal de encurvadura para a flexão global, $F_{V,BB}$, será dada por:

$$F_{V,BB} = \frac{\xi * \sum E_{cd} I}{L^2} \quad (2.3)$$

em que:

ξ – coeficiente dependente do número de pisos, da variação da rigidez, da rigidez do encastramento na base e da distribuição das cargas;

$\sum EI$ – soma dos fatores de rigidez de flexão dos elementos de contraventamento na direção considerada, sendo ponderada com um fator de 0.4 para um elemento de contraventamento fendilhado e 0.8 caso a secção transversal do elemento não esteja fendilhada, no estado limite último;

L – altura total do edifício acima do nível da secção de encastramento;

$$E_{cd} = \frac{E_{cm}}{1.2}$$

O coeficiente ξ , quando os elementos de contraventamento têm rigidez não variável em toda a altura e a carga vertical aumenta linearmente ao longo dos pisos, é determinado de acordo com o número de pisos e a flexibilidade relativa da secção de encastramento, através da seguinte expressão:

$$\xi = 7.8 * \frac{n_s}{n_s + 1.6} * \frac{1}{1 + 0.7 * k} \quad (2.4)$$

em que:

n_s – número de pisos;

k – flexibilidade relativa da secção de encastramento.

Por outro lado, quando as deformações de esforço transversal passam a ter significado, por exemplo em sistemas de contraventamento com aberturas de apreciável dimensão, os efeitos globais de segunda ordem podem ser ignorados, tendo em conta a carga global de encurvadura para o esforço transversal, se:

$$F_{V,Ed} \leq 0.1 * F_{V,B} = 0.1 * \frac{F_{V,BB}}{1 + \frac{F_{V,BB}}{F_{V,BS}}} \quad (2.5)$$

em que:

$F_{V,B}$ – carga global de encurvadura tendo em conta a flexão e o esforço transverso globais;

$F_{V,BB}$ – carga global de encurvadura para a flexão simples ilustrada na Figura 1 a);

$F_{V,BS}$ – carga global de encurvadura para o esforço transverso, $F_{V,BS} = \sum S$, retratada na Figura 1 b);

ΣS – rigidez total de esforço transverso (força por unidade de deformação angular por esforço transverso) dos elementos de contraventamento, que no caso dos elementos se encontrarem fendilhados, deverá ser ponderada da mesma forma que para EI [1].

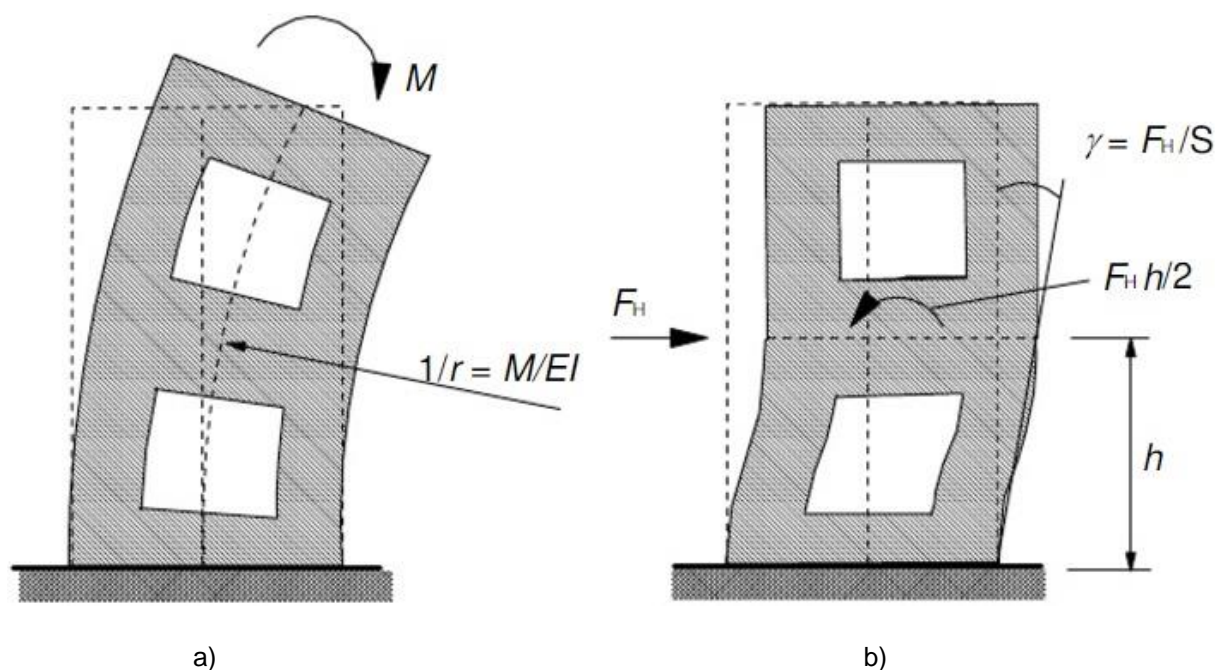


Figura 1 – Definição das deformações globais e das correspondentes rigidezes: a) de flexão, $1/R$ e EI , respetivamente; b) de esforço transverso Y e S , respetivamente [1].

2.3. MÉTODOS DE CÁLCULO DOS EFEITOS GLOBAIS DE SEGUNDA ORDEM PRECONIZADOS PELO EUROCÓDIGO 2

O método de cálculo dos efeitos globais de segunda ordem presente no Anexo H do Eurocódigo 2 sustenta-se na análise linear de segunda ordem de acordo com o Método da Rigidez Nominal em que são utilizados valores nominais para a rigidez de flexão considerando, no comportamento global, os efeitos da não linearidade dos materiais, da fluência e da fendilhação.

A introdução dos efeitos globais de segunda ordem é realizada através da majoração das forças horizontais de primeira ordem devidas ao vento, às imperfeições, etc.

$$F_{H,Ed} = \frac{F_{H,0Ed}}{1 - \frac{F_{V,Ed}}{F_{V,B}}} \quad (2.6)$$

em que:

$$F_{H,Ed} = F_{H,0Ed} * \beta, \text{ Figura 2;}$$

$F_{H,0Ed} = V + H$ – força horizontal de primeira ordem devida ao vento (V), às imperfeições (H), etc.;

$$\beta = \frac{1}{1 - \frac{F_{V,Ed}}{F_{V,B}}} - \text{fator de majoração das forças horizontais;}$$

$F_{V,Ed}$ – carga vertical total nos elementos contraventados e de contraventamento;

$F_{V,B}$ – carga global nominal de encurvadura com os valores nominais da rigidez de acordo com método da rigidez nominal, incluindo os efeitos da fluência.

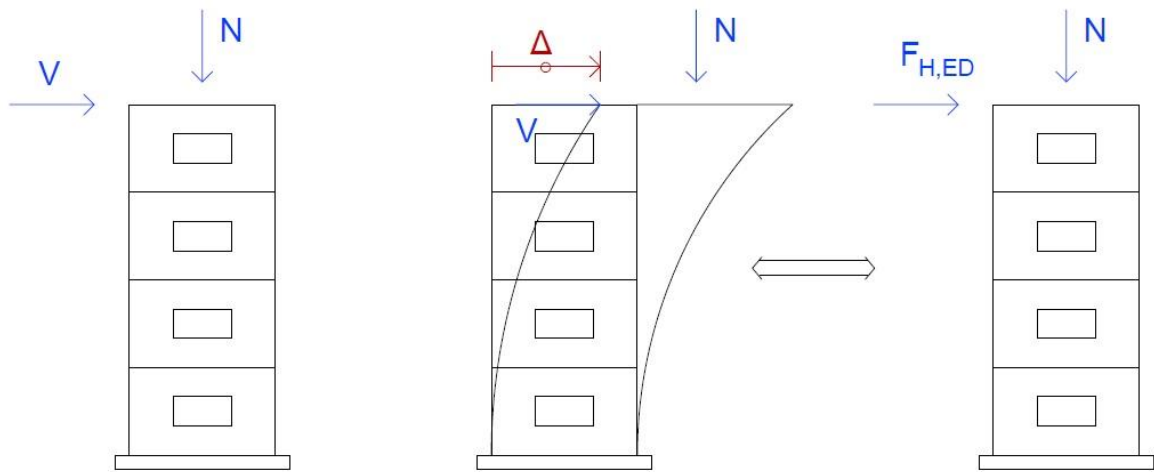


Figura 2 – Forças horizontais fictícias majoradas

3

METODOLOGIA

3.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo são discriminadas as paredes estruturais utilizadas no estudo das cargas de encurvadura, rigidez ao esforço transversal e fatores de majoração das forças horizontais para contabilização dos efeitos globais de segunda ordem. São definidas as dimensões das paredes, tipo de betão utilizado, dimensões das aberturas e condições de apoio e, malha de elementos finitos gerada automaticamente pelo *software* de cálculo estrutural *ROBOT*. Será também aplicada a metodologia preconizada pelo Eurocódigo para o cálculo das cargas de encurvadura, rigidez ao esforço transversal e fator de majoração das forças horizontais. As cargas verticais a que as paredes em estudo estão submetidas, pesos próprios e sobrecargas, e combinações das mesmas, serão determinadas de acordo com o Eurocódigo 0 e o Eurocódigo 1.

3.2. DESCRIÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO

3.2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente estudo foi direcionado para a estrutura de um edifício de um hotel, com uma planta retangular e regular em altura. Para as paredes de um edifício com cerca de 375 m² de área em planta, Figura 3, serão calculadas as cargas de encurvadura quando este tem 6, 10 e 15 pisos sem a presença de aberturas. A área em planta não é inicialmente um número exato, uma vez que as larguras das paredes de contraventamento serão adequadas ao fator de majoração das forças horizontais, fator β . Ou seja, para várias larguras das paredes de contraventamento serão calculados os fatores β (pré-dimensionamento das larguras das diferentes paredes), a partir da carga global de encurvadura pela equação (2.3) presente no Anexo H do EC2, de forma a que se obtenha uma parede com uma determinada largura, b , para a qual o fator seja de aproximadamente 1.2. A escolha deste valor está relacionada com o dimensionamento económico que este promove.

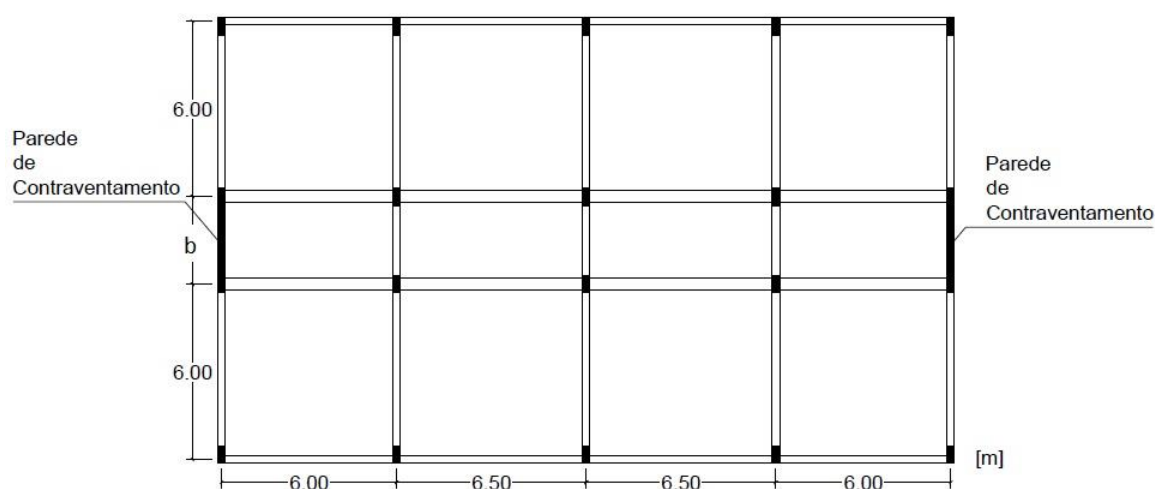


Figura 3 – Planta do edifício

Apesar do número variável de pisos, o último de cada estrutura analisada é considerado como uma cobertura não acessível.

Tomando valores típicos para os pesos próprios de lajes, revestimentos, paredes exteriores e interiores foram calculadas as cargas de cálculo em estado limite último, segundo os parâmetros indicados pelo Eurocódigo 0 e 1. A laje que constitui todos os pavimentos dos edifícios em estudo possui uma espessura de 25cm.

Os valores de cálculo foram obtidos através do cálculo de duas combinações de cargas, uma em que a ação variável base era a sobrecarga e outra, em que a ação base era o vento. Visto que o objetivo era encontrar o maior valor para as cargas verticais, foi adotada como condicionante, a combinação em que a ação base era a sobrecarga. Os valores propostos para os coeficientes de majoração, no estado limite último são 1.35 e 1.5 para as ações permanentes e variáveis, respetivamente. Nas Tabela 1 e Tabela 2 estão sintetizados os valores adotados para as cargas a que a estrutura está sujeita, e, os valores de cálculo para a carga total vertical que serão introduzidos no programa de cálculo.

Tabela 1 – Valores característicos das cargas verticais

	g_k [kN/m ²]					q_k [kN/m ²]
	Laje	Revestimentos	Paredes Interiores	Paredes Exteriores	Total	
Pisos 0 a 9	6.25	1.50	2.00	3.00	12.75	2
Cobertura	6.25	1.25	0	0	7.50	0.4

Tabela 2 – Valores de cálculo das cargas verticais

nº pisos	P_{ed} [kN/m ²]	Área [m ²]	P_{ed} [kN]	P_{ed}/piso [kN]	$P_{ed}/\text{piso}/m$ [kN/m]
6	111.78	187.5	20960.15	3493.35	1164.45
10	192.63	187.5	36119.53	3611.95	722.39
15	293.70	187.5	55068.75	3671.25	524.46

A estrutura do edifício possui duas paredes de contraventamento, dispostas simetricamente em planta. O esforço axial de cada parede é dado pela carga distribuída na área de influência da respetiva parede, enquanto que a carga vertical de cada parede, como elemento de contraventamento, para uma análise à encurvadura, é dada pela carga vertical total do edifício dividida de igual forma pelas duas paredes de contraventamento.

As paredes em estudo são concretizadas em betão C30/37 e possuem 0.25m de espessura. O pé direito de cada piso, é de 3m.

Para o cálculo das cargas de encurvadura pela metodologia preconizada pelo Eurocódigo 2 no Anexo H, foram calculados os momentos de inércia segundo a direção pretendida e atribuído o valor zero à flexibilidade da secção de encastramento para uma melhor comparação com os valores obtidos através do programa de cálculo automático. De forma a ter em consideração a fendilhação do betão no estado limite último, o fator de rigidez de flexão dos elementos de contraventamento na direção considerada foi assumido com o valor 0.4.

3.2.2. SIMULAÇÃO DAS PAREDES EM ESTUDO NO PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO *ROBOT*

No programa de cálculo automático, *ROBOT*, que procede ao cálculo estrutural através do método dos elementos finitos, foram simuladas todas as paredes que era necessário estudar através de elementos de casca. Cada parede é formada por um conjunto de painéis correspondente ao respetivo número de pisos. A geometria dos painéis para as paredes sem aberturas está representada na Figura 4, enquanto que as paredes com aberturas estão caracterizada na Figura 5, na Figura 6, na Figura 7, na Figura 8 e na Figura 9.

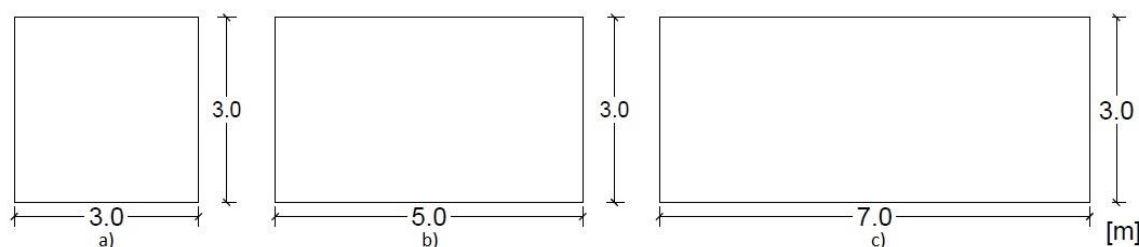


Figura 4 – Painéis sem aberturas: a) 6 pisos; b) 10 pisos; c) 15 pisos.

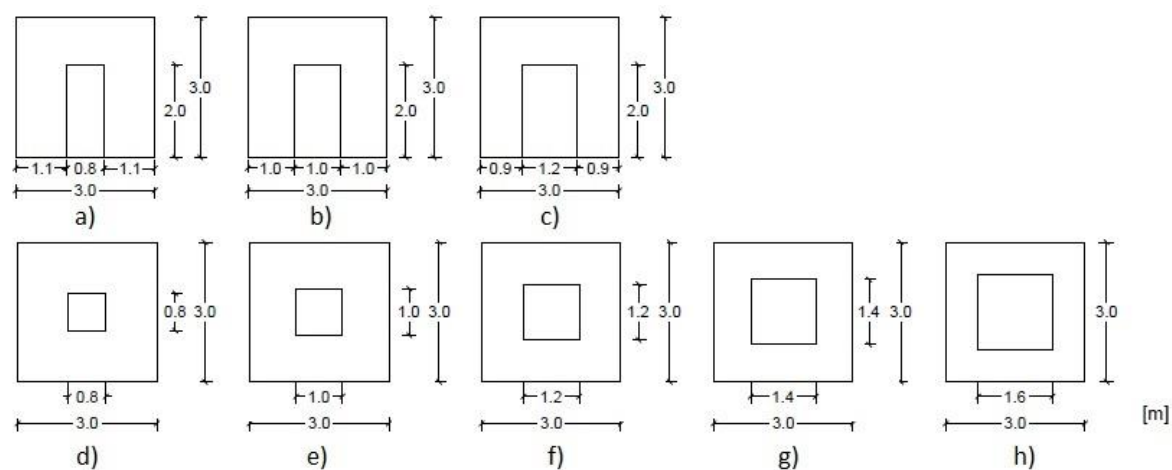


Figura 5 – Painéis com aberturas para paredes com 6 pisos

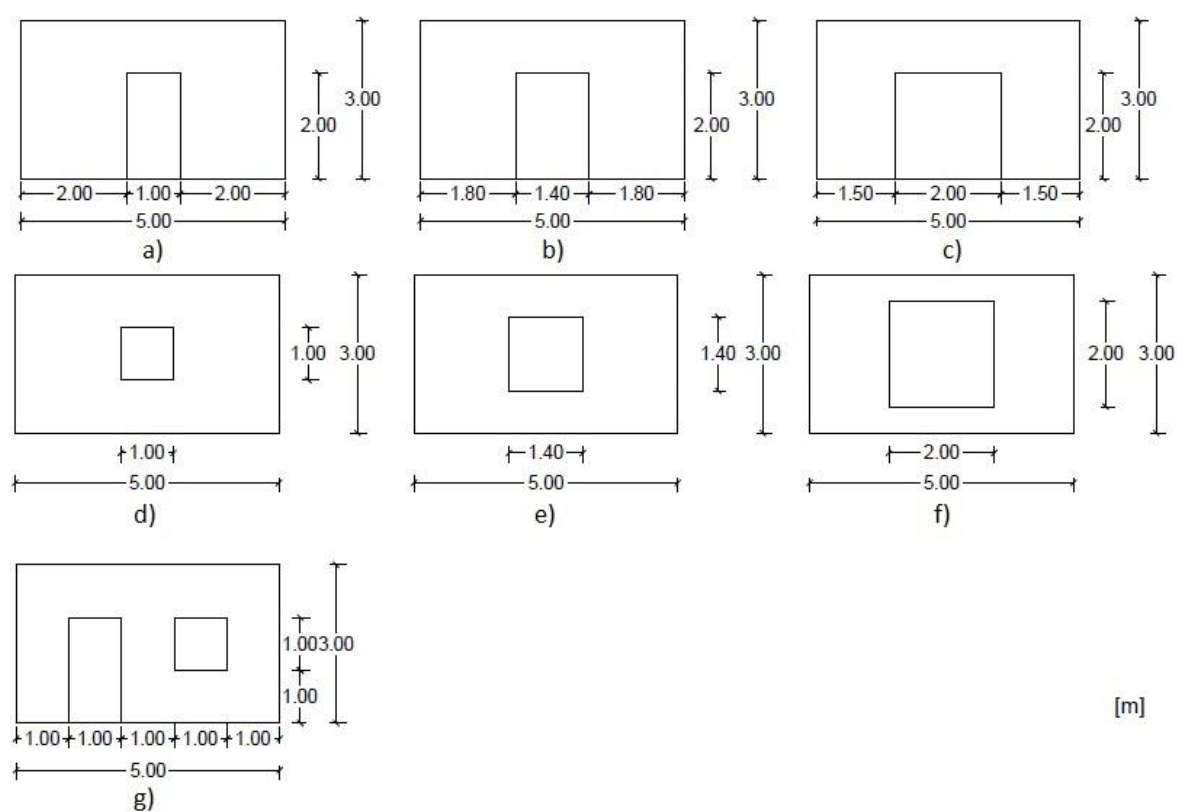


Figura 6 – Painéis com aberturas para paredes com 10 pisos

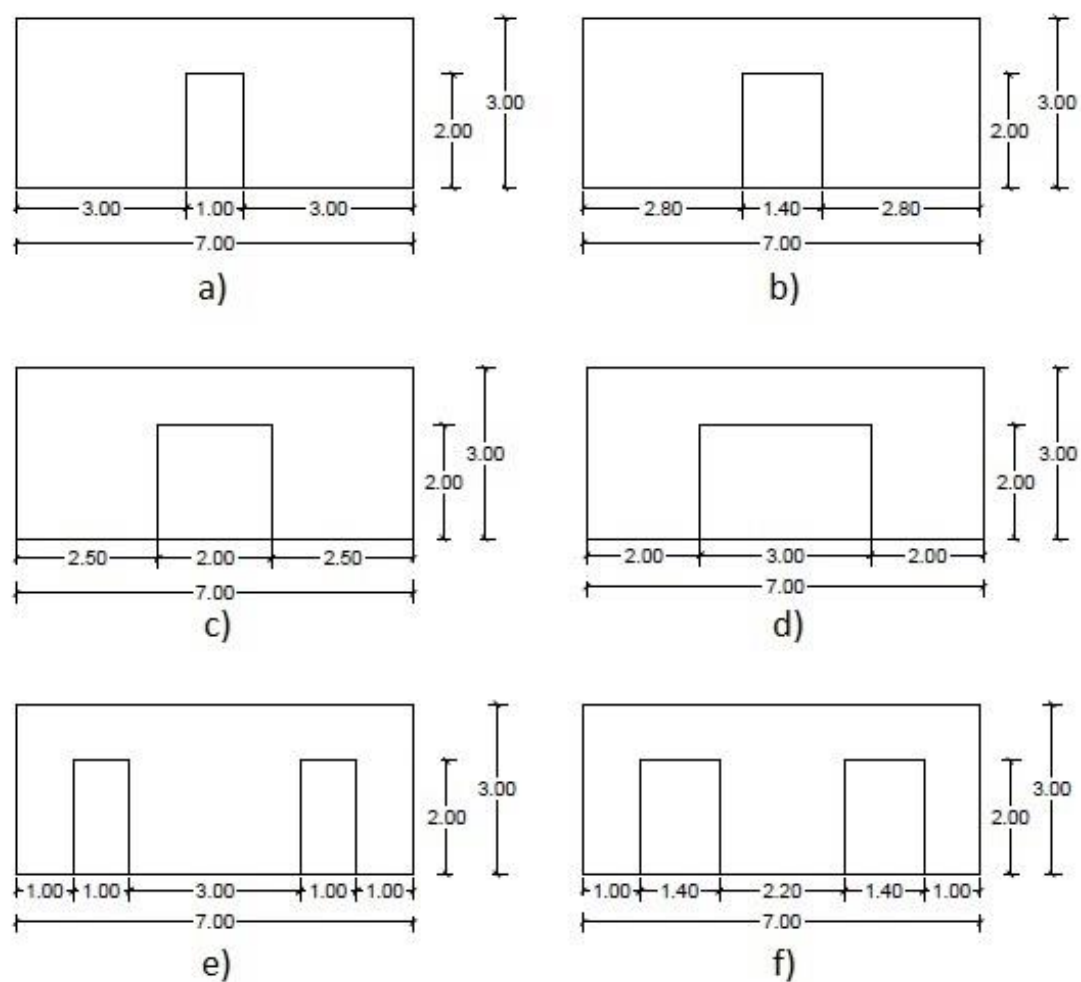


Figura 7 – Painéis com aberturas que simulam portas para paredes de 15 pisos

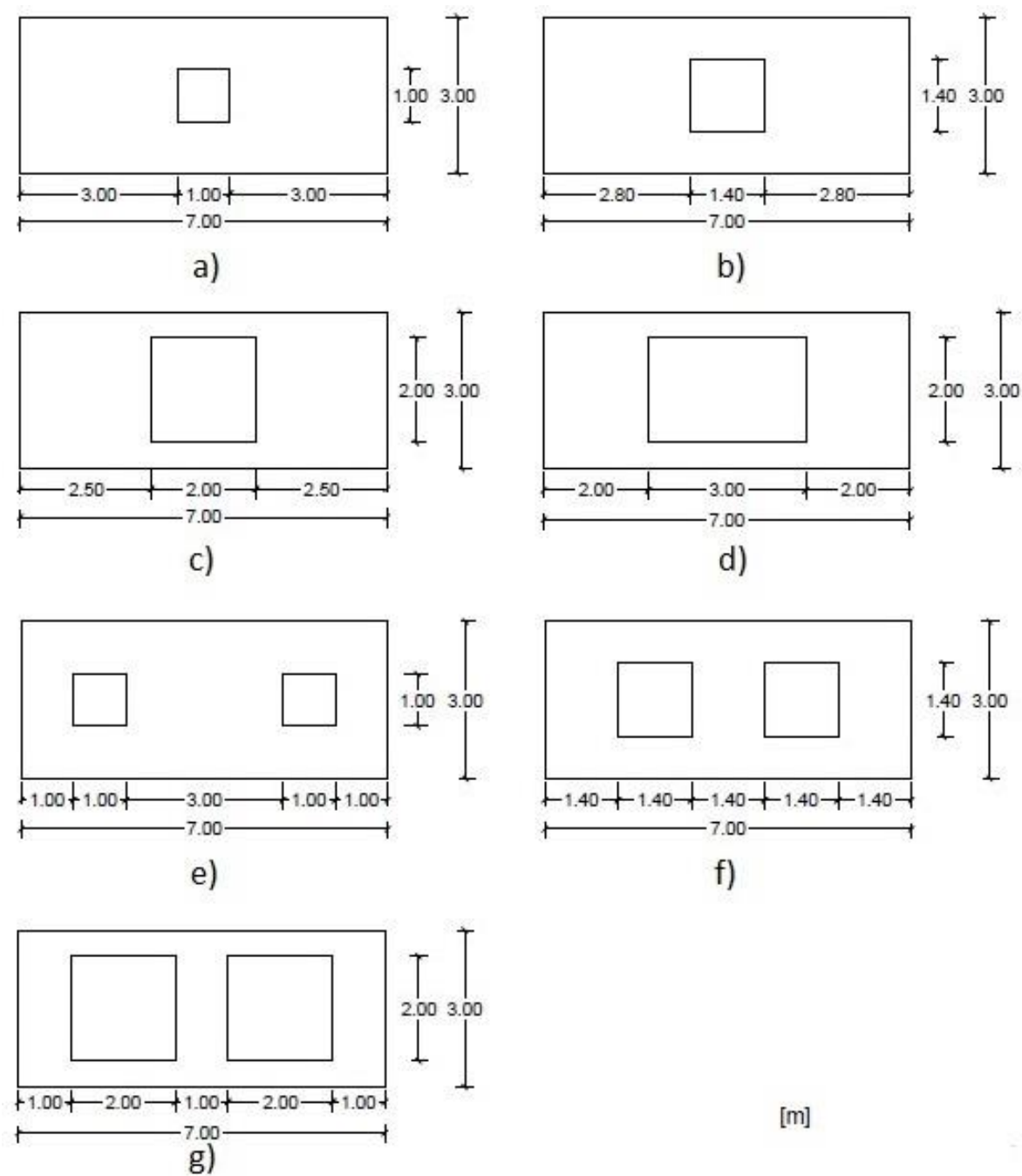


Figura 8 – Painéis com aberturas que simulam janelas para paredes de 15 pisos

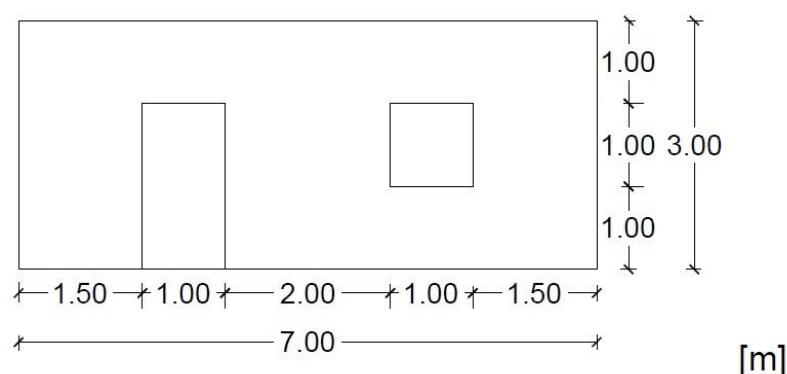


Figura 9 – Paineis com porta e janela de parede com 15 pisos

As malhas utilizadas em cada uma das paredes foram geradas automaticamente pelo *software*, sendo constituídas por elementos finitos quadrados de lado 1.5, 1, 0.25 e 0.1 m. Através de uma análise de encurvadura, efetuada automaticamente pelo *ROBOT* foram obtidos fatores de carga crítica, λ . Para cada malha de elementos finitos o programa de cálculo determina um fator de carga crítica. A multiplicação deste último pela carga vertical a que a parede está submetida no *software*, permite a obtenção da carga global de encurvadura. Assim sendo, a malha adotada para as diferentes paredes foi aquela, para a qual, a carga global de encurvadura diferia em menos de 1% da carga global de encurvadura obtida a partir da malha a seguir mais refinada. Para as paredes com 15, 10 e 6 pisos sem aberturas foram utilizados elementos quadrados de lado 1, 1 e 1.5, respetivamente, como se retrata na Figura 10.

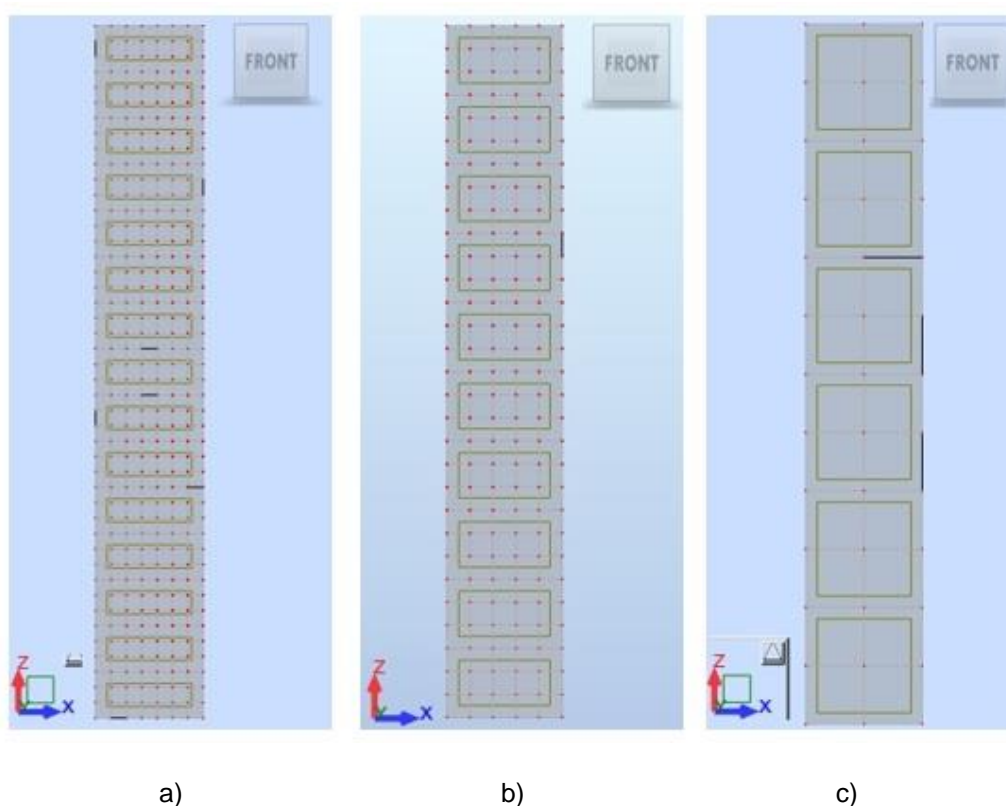


Figura 10 – Malhas de elementos finitos das paredes sem aberturas: a) parede de 15 pisos; b) parede de 10 pisos; c) parede de 6 pisos

Para as paredes que possuíam aberturas a malha foi ajustada, através de iterações, de acordo com as dimensões das aberturas, largura e altura, além do cumprimento do critério anteriormente descrito. Na Figura 11 está representada a malha de elementos finitos de uma parede com aberturas, de 10 pisos e com 5m de largura. Neste caso, em que foi introduzida uma abertura com 1.0m de largura e 2.0m de altura que, na realidade, traduziria a existência de uma porta, foi utilizada uma malha com elementos quadrados de 0.25m de lado, como se expõe na Figura 11.

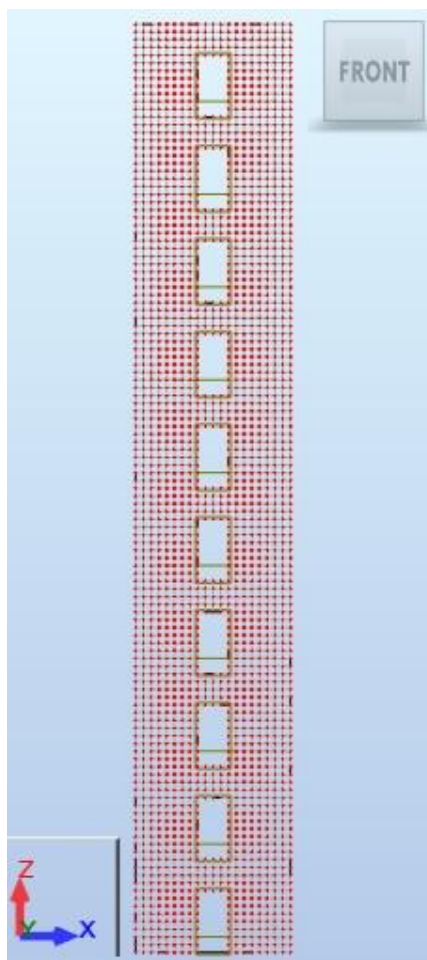


Figura 11 – Malha de elementos finitos para uma parede de 10 pisos com aberturas

Visto que o programa de cálculo estrutural utilizado possui uma base de dados com as características dos vários materiais, foi apenas necessário a criação de um novo material através da alteração do módulo de deformabilidade, E do betão C30/37, de modo a tentar reproduzir a existência de fendilhação no betão. Este módulo foi afetado do fator 0.3(3), resultante da multiplicação por 0.4, para a incorporação da fendilhação no betão, e da divisão por 1.2, para tornar o módulo de deformabilidade em valor de cálculo. Quanto aos apoios considerados, ilustrados na Figura 12, a secção da base da parede possui um encastramento perfeito, enquanto que os deslocamentos na direção y foram impedidos através de apoios simples, para que o modo de encurvadura pertinente para o estudo coincidissem com o primeiro modo de encurvadura.

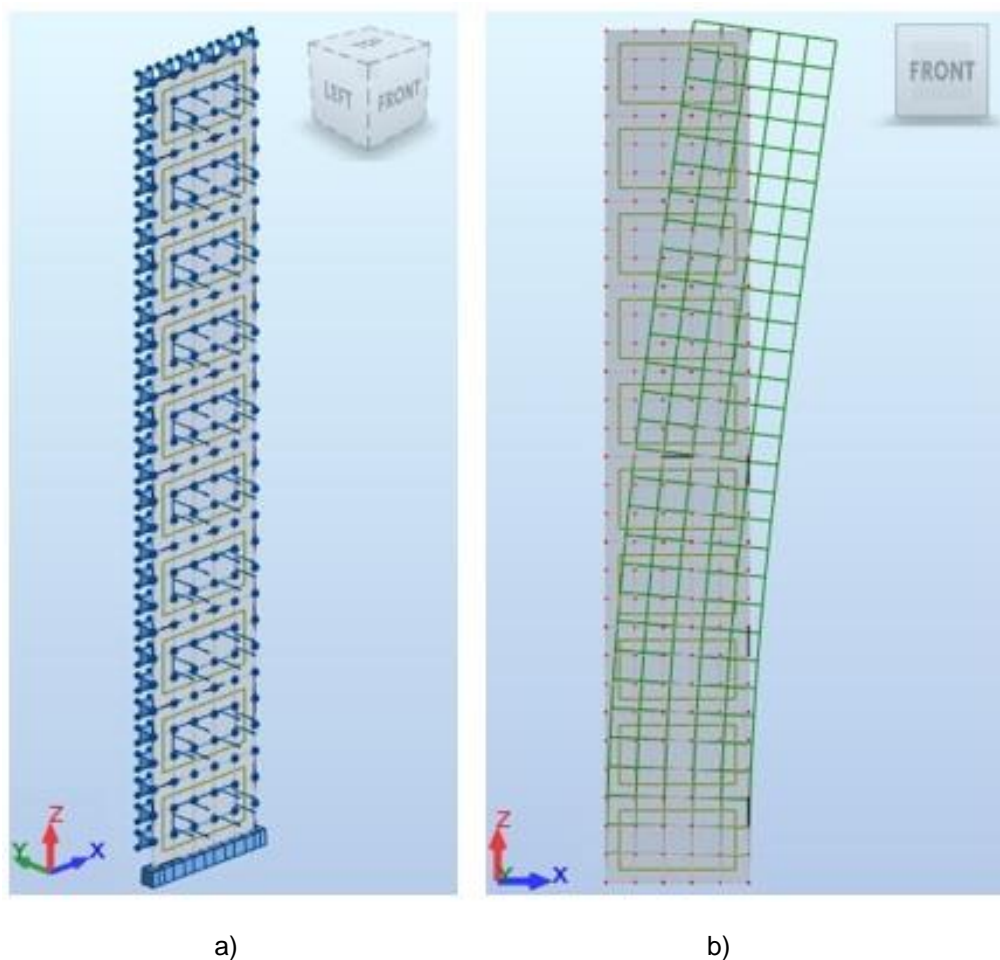


Figura 12 – Modelo da parede de 10 pisos sem aberturas para obtenção da carga global de encurvadura: a) condições de apoio; b) deformada correspondente ao primeiro modo de encurvadura.

Quando as paredes têm aberturas, foi necessário o cálculo de $F_{v,BS}$, carga global de encurvadura para o esforço transversal. Esta, por sua vez, foi calculada através do software, ROBOT, através da imposição de assentamentos de apoio de 3.0m em todos os pontos da malha de elementos finitos que se encontravam a três metros da secção da base da parede. Deste processo são obtidas as reações na direção X desses pontos, que quando somadas constituem a carga global de encurvadura por esforço transversal, Figura 13.

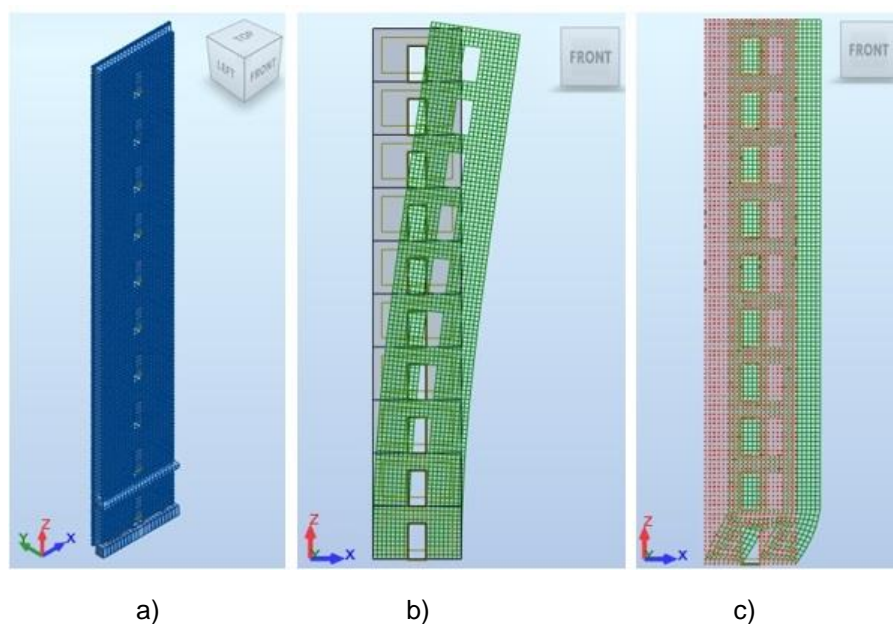


Figura 13 – Modelo da parede de 10 pisos com aberturas para obtenção das cargas globais de encurvadura: a) condições de apoio; b) deformada correspondente ao primeiro modo de encurvadura; c) deformada correspondente à encurvadura por esforço transversal

As cargas de cálculo foram distribuídas uniformemente ao longo dos pisos, Figura 14, e, para estas foi pedido ao programa de cálculo automático uma análise à encurvadura, para que se pudessem obter os fatores de carga crítica e consequentemente as cargas globais de encurvadura tendo em conta a flexão e o esforço transversal.

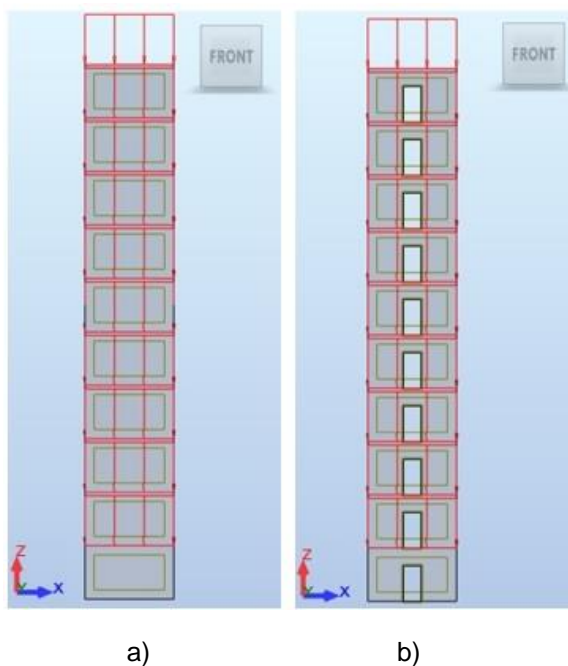


Figura 14 – Cargas uniformemente distribuídas ao longo dos pisos de duas paredes: a) parede sem aberturas; b) parede com aberturas.

3.3. PAREDES DE EDIFÍCIOS SEM ABERTURAS

As paredes sem aberturas estudadas pertenciam a edifícios com 6, 10 e 15 pisos. Através das equações (2.3) e (2.6) foram calculados a carga global nominal de encurvadura para a flexão global e o fator β , respetivamente. Como já mencionado anteriormente, o fator β foi calculado para paredes com diversas larguras de forma a que se conseguisse obter uma parede com uma determinada largura, tal que o fator fosse aproximadamente 1.2. De notar que também era necessário que, segundo o Eurocódigo 2, não fosse possível a dispensa dos efeitos globais de segunda ordem. Na Tabela 3 estão descritas as propriedades das paredes para as quais se procedeu ao cálculo, espessura, e , largura, b , momento de inércia, I , módulo de deformabilidade, E , módulo de deformabilidade de cálculo, E_{cd} , flexibilidade das extremidades, k , número de pisos, n_s , altura, L , carga global nominal de encurvadura para a flexão global calculada pela expressão (2.3), $F_{V,BB}$ (H) e fator de majoração, β , calculado pela equação (2.6).

As paredes para as quais foi calculada a carga global de encurvadura pela equação (2.3) presente no Anexo H do EC2, especificadas na Tabela 3, fizeram parte do processo de pré-dimensionamento para a obtenção de uma parede de espessura 0.25m, com uma determinada largura, para cada um dos três edifícios, com 6, 10 e 15 pisos.

Tabela 3 – Propriedades físicas das paredes

Parede	e [m]	b [m]	I [m ⁴]	E_{cd} [GPa]	k	n_s	L [m]	$F_{V,BB}$ (H) [kN]	β (H)
A	0.25	3	0.56250	11	0	6	18	117598.68	1.217
B	0.25	4	1.33333	11	0	6	18	278752.44	1.081
C	0.25	4	1.33333	11	0	10	30	109578.54	1.492
D	0.25	5	2.60417	11	0	10	30	214020.59	1.203
E	0.25	5	2.60417	11	0	15	45	99704.37	2.234
F	0.25	6	4.50000	11	0	15	45	172289.16	1.470
G	0.25	7	7.14583	11	0	15	45	273588.80	1.252

Através da Tabela 3 verifica-se que as paredes A,D e G são aquelas para as quais o fator de majoração das forças horizontais é aproximadamente 1.2. Visto que para um dimensionamento económico, o fator β deverá rondar o valor de 1.2, para as paredes A, D e G foram calculados os fatores de carga crítica de encurvadura, λ , através de uma análise de segunda ordem pelo *software Robot*.

Os fatores, λ , permitiram o cálculo das cargas globais de encurvadura tendo em conta a flexão e o esforço transversal globais, $F_{V,B}$, através da multiplicação dos mesmos pela carga vertical total a que a parede estava submetida, $F_{V,Ed}$, Tabela 4. Posteriormente, para as paredes A, D e G foram introduzidas aberturas com várias dimensões para que se pudessem analisar as diferenças entre cargas de encurvadura de paredes com as mesmas dimensões globais, mas com e sem aberturas.

Na Tabela 4 estão indicados os valores das cargas globais de encurvadura calculadas através do EC2 e do *ROBOT*, os valores dos fatores β determinados a partir das cargas globais de encurvadura calculadas através do EC2 e do *ROBOT* e os valores dos fatores de carga crítica de encurvadura, λ . De forma a simplificar a designação de todas estas grandezas, foram adotadas as seguintes simplificações:

- $F_{V,BB}$ (H), carga global nominal de encurvadura para a flexão global calculada a partir da equação (2.3) presente no Anexo H do EC2;

- β (H), fator de majoração das forças horizontais determinado a partir da carga global nominal de encurvadura para a flexão global calculada a partir da equação (2.3) presente no Anexo H do EC2;
- $F_{V,B}$ (R), carga global de encurvadura tendo em conta a flexão e o esforço transverso globais calculada a partir do ROBOT;
- β (R), fator de majoração das forças horizontais determinado a partir da carga global de encurvadura tendo em conta a flexão e o esforço transverso globais, calculada a partir do ROBOT.

Tabela 4 – Carga global nominal de encurvadura para a flexão global pela expressão (2.3), carga global de encurvadura pelo ROBOT e respetivos fatores de majoração das forças horizontais, β de paredes sem aberturas.

Parede	$F_{V,BB}$ (H) [kN]	β (H)	$F_{V,Ed}$ [kN]	λ	$F_{V,B}$ (R) [kN]	β (R)
A	117598.68	1.217	20960.3	5.561	116563.79	1.219
D	214020.59	1.203	36119.6	5.800	209501.27	1.208
G	273588.80	1.252	55068.8	4.872	268313.92	1.258

Os valores das cargas globais de encurvadura obtidos pela equação (2.3) e pelo programa de cálculo automático apresentam diferenças entre si, pelo que se procedeu ao cálculo do desvio percentual. Esta variação percentual será calculada pela expressão (3.1). Como o fator β está intrinsecamente relacionado com a carga global de encurvadura, também foram apresentados os respetivos desvios, usando para estes últimos a equação (3.2).

$$Desvio (F_{V,B}) = \frac{F_{V,BB} (H) - F_{V,B} (R)}{F_{V,B} (R)} \quad (3.1)$$

$$Desvio (\beta) = \frac{\beta (H) - \beta (R)}{\beta (R)} \quad (3.2)$$

3.4. PAREDES DE EDIFÍCIOS COM ABERTURAS

As paredes A, D e G, de larguras 3, 5 e 7m, respetivamente, uma vez que apresentaram fatores β de aproximadamente 1.2, sofreram alterações na sua geometria através da introdução de aberturas de forma a simularem a presença de portas e janelas. As dimensões arbitradas para as aberturas tentaram corresponder as situações que podem ocorrer em paredes de contraventamento de edifícios.

Os rácios, A_0/A , Figura 15 e Tabela 5, entre as áreas das aberturas e as áreas dos painéis sem aberturas situam-se entre os 4 e 40%.

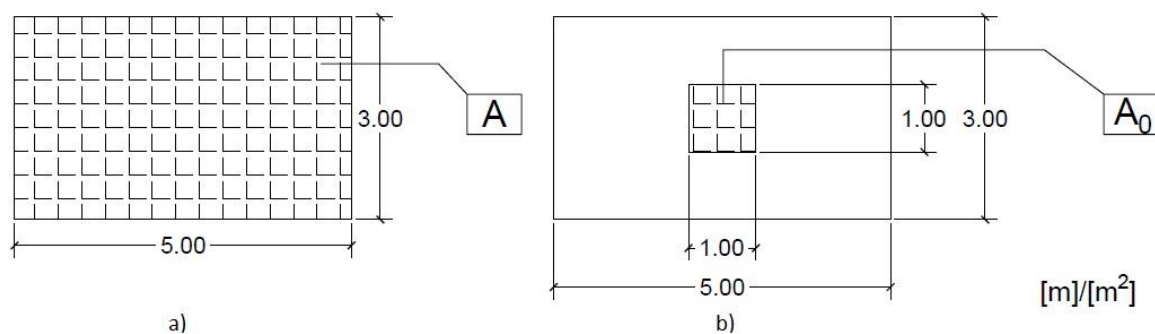


Figura 15 – a) Área do painel sem abertura (A); b) Área da abertura (A_0).

Tabela 5 – Áreas das aberturas e respetivos rácios

Parede	A_0 [m²]	A_0/A [%]
A.1.1	0.8x2.0	17.78
A.1.2	1.0x2.0	22.22
A.1.3	1.2x2.0	26.67
A.2.1	0.8x0.8	7.11
A.2.2	1.0x1.0	11.11
A.2.3	1.2x1.2	16.00
A.2.4	1.4x1.4	21.78
A.2.5	1.6x1.6	28.44
D.1.1	1.0x2.0	13.33
D.1.2	1.4x2.0	18.67
D.1.3	2.0x2.0	26.67
D.2.1	1.0x1.0	6.67
D.2.2	1.4x1.4	13.07
D.2.3	2.0x2.0	26.67
D.3.1	1.0x2.0 1.0x1.0	20.00
G.1.1	1.0x2.0	9.52
G.1.2	1.4x2.0	13.33
G.1.3	2.0x2.0	19.05
G.1.4	3.0x2.0	28.57
G.1.5	1.0x2.0 1.0x2.0	19.05
G.1.6	1.4x2.0 1.4x2.0	26.67
G.2.1	1.0x1.0	4.76
G.2.2	1.4x1.4	9.30
G.2.3	2.0x2.0	19.05
G.2.4	3.0x2.0	28.57
G.2.5	1.0x1.0 1.0x1.0	9.52
G.2.6	1.4x1.4 1.4x1.4	18.67
G.2.7	2.0x2.0 2.0x2.0	38.10
G.3.1	1.0x1.0 1.0x2.0	14.29

As identificações utilizadas para as diversas paredes com aberturas estão definidas na Tabela 6, na qual está indicada a figura correspondente à geometria de cada painel: Figura 5, Figura 6, Figura 7, Figura 8 e Figura 9. Foi atribuída a designação de “porta” quando a abertura se inicia à cota de início de cada painel e, de “janela” quando a abertura se localiza na zona intermédia de cada painel, respetivamente.

Tabela 6 – Identificação das paredes com aberturas, dimensões das aberturas e dimensões dos elementos finitos (EF) utilizadas pelo ROBOT

Parede	Figura	Abertura(s)	Dimensões dos EF [m ²]
A.1.1	5.a)	Porta (0.8x2.0m ²)	0.10x0.10
A.1.2	5.b)	Porta (1.0x2.0m ²)	0.25x0.25
A.1.3	5.c)	Porta (1.2x2.0m ²)	0.10x0.10
A.2.1	5.d)	Janela (0.8x0.8m ²)	0.10x0.10
A.2.2	5.e)	Janela (1.0x1.0m ²)	0.25x0.25
A.2.3	5.f)	Janela (1.2x1.2m ²)	0.10x0.10
A.2.4	5.g)	Janela (1.4x1.4m ²)	0.10x0.10
A.2.5	5.h)	Janela (1.6x1.6m ²)	0.10x0.10
D.1.1	6.a)	Porta (1.0x2.0m ²)	0.25x0.25
D.1.2	6.b)	Porta (1.4x2.0m ²)	0.10x0.10
D.1.3	6.c)	Porta (2.0x2.0m ²)	0.25x0.25
D.2.1	6.d)	Janela (1.0x1.0m ²)	0.25x0.25
D.2.2	6.e)	Janela (1.4x1.4m ²)	0.10x0.10
D.2.3	6.f)	Janela (2.0x2.0m ²)	0.10x0.10
D.3.1	6.g)	Porta (1.0x2.0m ²) e janela (1.0x1.0m ²)	0.25x0.25
G.1.1	7.a)	Porta (1.0x2.0m ²)	0.25x0.25
G.1.2	7.b)	Porta (1.4x2.0m ²)	0.10x0.10
G.1.3	7.c)	Porta (2.0x2.0m ²)	0.25x0.25
G.1.4	7.d)	Porta (3.0x2.0m ²)	0.10x0.10
G.1.5	7.e)	Porta (1.0x2.0m ²) e porta (1.0x2.0m ²)	0.25x0.25
G.1.6	7.f)	Porta (1.4x2.0m ²) e porta (1.4x2.0m ²)	0.10x0.10
G.2.1	8.a)	Janela (1.0x1.0m ²)	0.25x0.25
G.2.2	8.b)	Janela (1.4x1.4m ²)	0.10x0.10
G.2.3	8.c)	Janela (2.0x2.0m ²)	0.10x0.10
G.2.4	8.d)	Janela (3.0x2.0m ²)	0.10x0.10
G.2.5	8.e)	Janela (1.0x1.0m ²) e janela (1.0x1.0m ²)	0.25x0.25
G.2.6	8.f)	Janela (1.4x1.4m ²) e janela (1.4x1.4m ²)	0.10x0.10
G.2.7	8.g)	Janela (2.0x2.0m ²) e janela (2.0x2.0m ²)	0.10x0.10
G.3.1	9	Janela (1.0x1.0m ²) e porta (1.0x2.0m ²)	0.25x0.25

Para cada parede com aberturas foi calculada a carga global nominal de encurvadura para a flexão global, $F_{V,BB}$ (H), pela equação (2.3) que está preconizada no Anexo H do Eurocódigo 2, a carga global de encurvadura para o esforço transversal, $F_{V,BS}$ (R) e a carga global de encurvadura tendo em conta a flexão e o esforço transversal globais, $F_{V,B}$ (R), pelo programa de cálculo ROBOT. Foram também determinadas a carga global de encurvadura tendo em conta a flexão e o esforço transversal globais pela equação (2.5) presente do Anexo H do Eurocódigo 2. Para cada uma destas grandezas, exceto para a carga global de

encurvadura para o esforço transversal calculada pelo programa de cálculo, foi determinado o fator de majoração das forças horizontais fictícias, β , Tabela 7 e Tabela 8.

Assim como foi feito para as paredes sem aberturas e de forma a simplificar a designação de todas grandezas referidas anteriormente, foram adotadas as seguintes simplificações:

- $F_{V,BB}$ (H), carga global nominal de encurvadura para a flexão global calculada a partir da equação (2.3) presente no Anexo H do EC2, Tabela 7;
- β ($F_{V,BB}$ (H)), fator de majoração das forças horizontais determinado a partir da carga global nominal de encurvadura para a flexão global calculada a partir da equação (2.3) presente no Anexo H do EC2, Tabela 7;
- $F_{V,B}$ (H), carga global de encurvadura tendo em conta a flexão e o esforço transversal globais calculada a partir da equação (2.5) presente no Anexo H do EC2, Tabela 7;
- β ($F_{V,B}$ (H)), fator de majoração das forças horizontais determinado a partir da carga global de encurvadura tendo em conta a flexão e o esforço transversal globais calculada a partir da equação (2.5) presente no Anexo H do EC2, Tabela 7;
- $F_{V,B}$ (R), carga global de encurvadura tendo em conta a flexão e o esforço transversal globais calculada a partir do ROBOT, Tabela 8;
- β (R), fator de majoração das forças horizontais determinado a partir da carga global de encurvadura tendo em conta a flexão e o esforço transversal globais, calculada a partir do ROBOT, Tabela 8;
- $F_{V,B}$ (R), carga global de encurvadura para o esforço transversal, Tabela 7.

Para o cálculo da carga global nominal de encurvadura para a flexão global foi necessário o cálculo da soma dos fatores de rigidez na direção considerada. Para tal, e visto que o Anexo H do Eurocódigo 2 não esclarece sobre como avaliar o momento de inércia a considerar quando o elemento de contraventamento tem aberturas, cada inércia global, I_y , Figura 16, foi calculada para uma secção transversal que atravessa todas as aberturas de cada painel, recorrendo depois ao teorema de Steiner para tomar em consideração o afastamento das secções úteis de betão armado da parede. Na Figura 16 encontram-se representadas as secções, para as quais foram calculados os momentos de inércia, I_y , para três das paredes de 10 pisos com aberturas.

Tabela 7 – Rádios de áreas das paredes com aberturas, valores dos momentos de inércia utilizados na expressão (2.3), carga global de encurvadura para o esforço transversal, carga global de encurvadura pela expressão (2.3) e pela expressão (2.5) e respetivos fatores de majoração das forças horizontais.

Parede	A_0/A [%]	I [m ⁴]	n_s	$F_{V,BB}(H)$ [kN]	$\beta(F_{V,BB}(H))$	$F_{V,BS}(R)$ [kN]	$F_{V,B}(H)$ [kN]	$\beta(F_{V,B}(H))$
A.1.1	17.78	0.5518	6	115368.60	1.222	878973.30	101982.94	1.259
A.1.2	22.22	0.5417		113243.25	1.227	745992.10	98318.31	1.271
A.1.3	26.67	0.5265		110072.37	1.235	583185.40	92595.57	1.293
A.2.1	7.11	0.5518		115367.97	1.222	1443246.00	106828.48	1.244
A.2.2	11.11	0.5417		113243.25	1.227	1173000.40	103273.10	1.255
A.2.3	16.00	0.5265		110072.37	1.235	831847.70	97209.36	1.275
A.2.4	21.78	0.5053	10	105647.10	1.248	577366.50	89305.83	1.307
A.2.5	28.44	0.4772		99758.60	1.266	374594.20	78778.90	1.363
D.1.1	13.33	2.5833		212308.40	1.205	2698243.06	196821.69	1.225
D.1.2	18.67	2.5470		209322.41	1.209	2245041.00	191470.18	1.233
D.1.3	26.67	2.4375		200323.28	1.220	1663131.74	178788.32	1.253
D.2.1	6.67	2.5833		212308.16	1.205	3279504.98	199399.46	1.221
D.2.2	13.07	2.5470	15	209322.41	1.209	2461208.00	192915.23	1.230
D.2.3	26.67	2.4375		200323.28	1.220	1469453.68	176290.48	1.258
D.3.1	20.00	2.0625		169504.31	1.271	1725581.00	154343.14	1.306
G.1.1	9.52	7.1250		272791.16	1.253	4971857.00	258602.41	1.271
G.1.2	13.33	7.0887		271400.10	1.255	4495200.00	255947.16	1.274
G.1.3	19.05	6.9792		267207.85	1.260	3861297.00	249913.44	1.283
G.1.4	28.57	6.5833		252052.64	1.280	2710409.00	230607.46	1.314
G.1.5	19.05	5.1042	15	195420.70	1.392	3500220.00	185087.11	1.424
G.1.6	26.67	7.1250		182377.64	1.433	2508520.00	170016.86	1.479
G.2.1	4.76	7.0887		272791.16	1.253	5590160.00	260098.75	1.269
G.2.2	9.30	6.9792		271400.10	1.255	4745085.00	256716.91	1.273
G.2.3	19.05	6.5833		267207.85	1.260	3626682.00	248871.42	1.284
G.2.4	28.57	5.1042		252052.53	1.280	2508202.00	229036.36	1.317
G.2.5	9.52	5.6595	15	195420.70	1.392	4582691.00	187428.16	1.416
G.2.6	18.67	5.9792		216682.33	1.341	2700630.00	200588.33	1.378
G.2.7	38.10	4.5625		174682.06	1.460	1002004.00	148750.06	1.588
G.3.1	14.29	4.7635		228921.37	1.317	3818375.00	215973.22	1.342

Tabela 8 – Carga global de encurvadura pelo programa de cálculo estrutural, ROBOT e respetivo fator de majoração das forças horizontais

Parede	A_0/A [%]	n_s	$F_{V,Ed}$ [kN]	λ	$F_{V,B}(R)$ [kN]	$\beta(R)$
A.1.1	17.78	6	20960.3	4.9806	104395.08	1.251
A.1.2	22.22			4.8191	101009.15	1.262
A.1.3	26.67			4.5154	94643.72	1.284
A.2.1	7.11			5.3292	111700.58	1.231
A.2.2	11.11			5.2088	109178.22	1.238
A.2.3	16.00			4.9655	104077.53	1.252
A.2.4	21.78			4.6231	96901.35	1.276
A.2.5	28.44			4.1337	86642.96	1.319
D.1.1	13.33	10	36119.6	5.4227	195864.67	1.226
D.1.2	18.67			5.1293	185266.46	1.242
D.1.3	26.67			4.6414	167644.79	1.275
D.2.1	6.67			5.6673	204702.05	1.214
D.2.2	13.07			5.4445	196654.61	1.225
D.2.3	26.67			4.5552	164533.09	1.281
D.3.1	20.00			4.5355	163819.00	1.283
G.1.1	9.52	15	55068.8	4.6681	257066.11	1.273
G.1.2	13.33			4.5066	248174.16	1.285
G.1.3	19.05			4.2418	233591.94	1.308
G.1.4	28.57			3.5454	195240.37	1.393
G.1.5	19.05			3.4646	190793.57	1.406
G.1.6	26.67			3.1231	171987.57	1.471
G.2.1	4.76			4.8074	264738.30	1.263
G.2.2	9.30			4.6974	258681.83	1.270
G.2.3	19.05			4.1942	230971.21	1.313
G.2.4	28.57			3.5226	193985.35	1.396
G.2.5	9.52			3.7759	207935.38	1.360
G.2.6	18.67			3.8167	210182.74	1.355
G.2.7	38.10			2.7246	150041.00	1.580
G.3.1	14.29			4.0774	224539.18	1.325

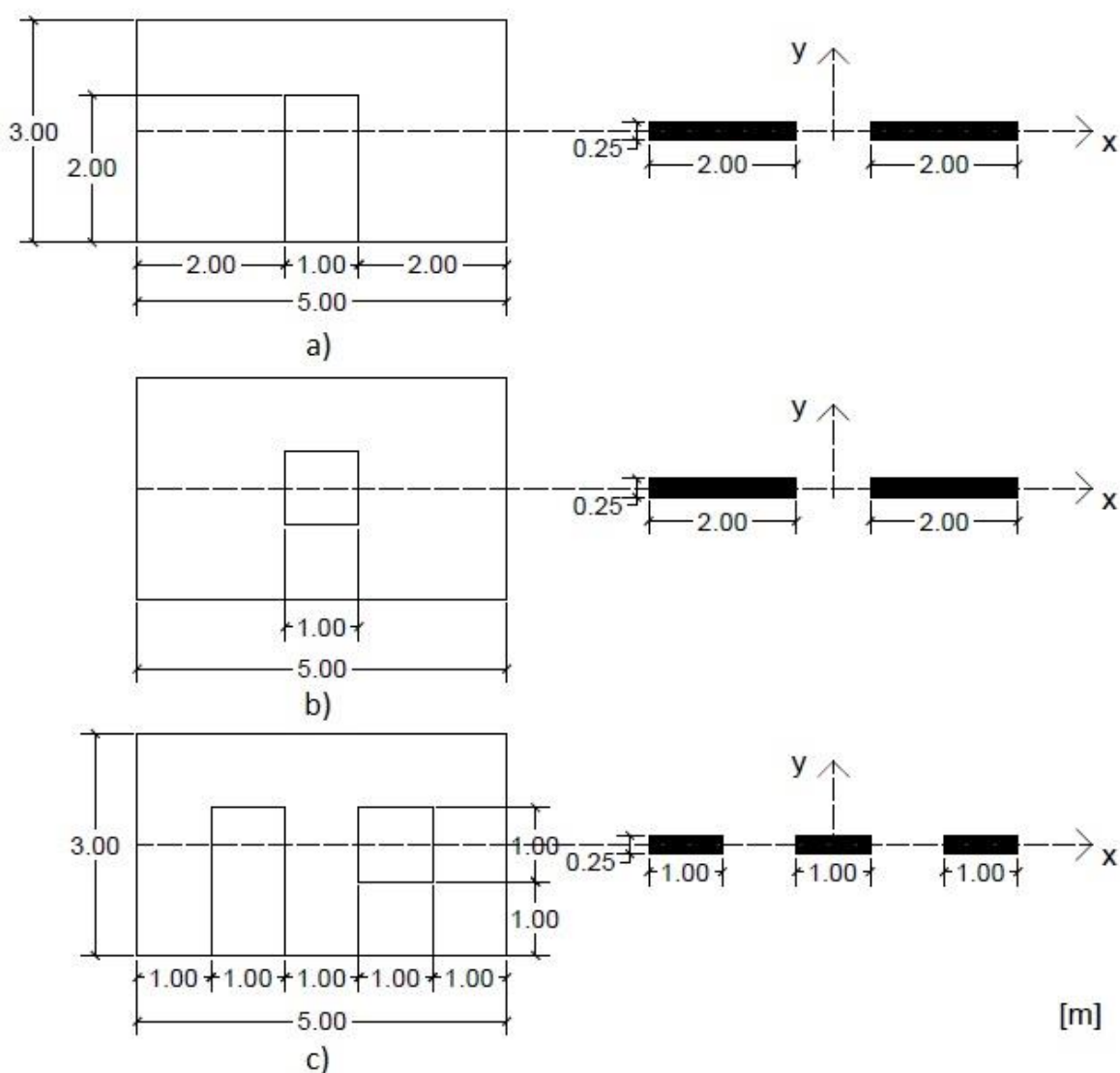


Figura 16 – Secção transversal para o cálculo do momento de inércia

Visto terem sido determinadas diferentes cargas globais de encurvadura que envolvem capacidades distintas de flexão, de esforço transversal, ou da conjugação das duas, foram determinados três desvios entre os mesmos, de forma a tentarem refletir o significado de cada um. Os três desvios calculados apresentam-se a seguir na equação (3.3), na equação (3.4) e na equação (3.5). Genericamente e por questões de simplificação, os desvios para as diferentes cargas globais de encurvadura foram designados por desvio ($F_{v,B}$) diferenciando-se apenas na numeração atribuída.

$$\text{Desvio 1 } (F_{v,B}) = \frac{F_{v,BB}(H) - F_{v,B}(R)}{F_{v,B}(R)} \quad (3.3)$$

$$\text{Desvio 2 } (F_{v,B}) = \frac{F_{v,BB}(H) - F_{v,B}(H)}{F_{v,B}(H)} \quad (3.4)$$

$$Desvio\ 3\ (Fv, B) = \frac{F_{V,B}(H) - F_{V,B}(R)}{F_{V,B}(R)} \quad (3.5)$$

Dado que o fator β depende apenas da carga vertical a que o edifício está submetido e da carga global de encurvadura, foram também calculados três desvios correspondentes aos valores utilizados para a carga global de encurvadura, discriminados nas equações (3.6), (3.7) e (3.8).

$$Desvio\ 1\ (\beta) = \frac{\beta(F_{V,BB}(H)) - \beta(F_{V,B}(R))}{\beta(F_{V,B}(R))} \quad (3.6)$$

$$Desvio\ 2\ (\beta) = \frac{\beta(F_{V,BB}(H)) - \beta(F_{V,B}(H))}{\beta(F_{V,B}(H))} \quad (3.7)$$

$$Desvio\ 3\ (\beta) = \frac{\beta(F_{V,B}(H)) - \beta(F_{V,B}(R))}{\beta(F_{V,B}(R))} \quad (3.8)$$

3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo deste capítulo foi descrito todo o procedimento de trabalho adotado para o estudo da influência da presença de aberturas nas cargas globais de encurvadura em paredes de contraventamento. Os resultados obtidos para as cargas globais de encurvadura, tendo em conta a flexão e o esforço transversal, tanto pela metodologia preconizada pelo Eurocódigo 2 no Anexo H como pelo ROBOT, serão discutidos no capítulo seguinte, de forma a poder avaliar a sua relevância no fator β . Será dada especial atenção à variação deste fator com o valor da carga global de encurvadura.

4

ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1. INTRODUÇÃO

No capítulo anterior, onde se apresentaram as paredes de contraventamento estudadas, foram calculadas as cargas de encurvadura globais através do programa de cálculo automático e das equações presentes no Anexo H do Eurocódigo 2. Estas, foram calculadas apenas para a flexão global, $F_{V,BB}$, ou para o esforço transversal, $F_{V,BS}$, ou tendo em conta a flexão e o esforço transversal globais, $F_{V,B}$. No presente capítulo serão realizadas algumas comparações entre os valores para as cargas de encurvadura obtidas pelas equações propostas pelo Anexo H do Eurocódigo 2 e as fornecidas pelo programa automático de cálculo estrutural, *ROBOT*. Serão também confrontados os valores obtidos para o fator β , de acordo com o valor da carga global de encurvadura utilizado no seu cálculo. As observações a efetuar visam perceber a partir de que rácios A_0/A (A_0 - área das aberturas; A - área total do painel sem abertura), deverá ser utilizada a equação (2.5) em detrimento da equação (2.3).

4.2. PAREDES DE EDIFÍCIOS SEM ABERTURAS

As paredes sem aberturas possuem secção transversal constante ao longo de toda a sua altura, o que implica uma rigidez também ela constante ao longo dessa dimensão. Visto não possuírem aberturas, as deformações globais por corte são desprezáveis. As paredes assumem-se rigidamente fixas à base, implicando desta forma que as rotações são nulas no encastramento, e as cargas verticais uniformemente distribuídas, aumentam a mesma quantidade por piso. Uma vez que as paredes possuem todas estas características, previa-se que a carga global nominal de encurvadura para a flexão global obtida pela equação (2.3) se aproximasse bastante da carga global de encurvadura obtida através do programa de cálculo automático. Este último é tomado como fornecendo o valor de referência para a caracterização da carga global de encurvadura. De notar que para as três paredes sem aberturas o valor máximo da variação entre os valores da carga global de encurvadura pela expressão (2.3) presente no Anexo H do Eurocódigo 2 e o obtido pelo *ROBOT*, é de 2.16 % (ver Tabela 9).

Tabela 9 – Desvio ($F_{V,BB}$) e desvio (β) para paredes sem aberturas

Parede	n_s	$F_{V,BB}$ (H) [kN]	$F_{V,B}$ (R) [kN]	Desvio ($F_{V,B}$) [%]	Desvio (β) [%]
A	6	117598.68	116563.79	0.89	-0.19
D	10	214020.59	209501.27	2.16	-0.44
G	15	273588.80	268313.92	1.97	-0.50

Refletindo essa variação da carga global de encurvadura no fator de majoração das forças horizontais, o maior valor obtido para o desvio de β foi 0.5%, verificado na parede do edifício de 15 pisos. Pode então dizer-se que as expressões presentes no Anexo H do Eurocódigo 2 para o cálculo da carga global nominal de encurvadura para a flexão global permitem a determinação de um fator de majoração das forças horizontais, para a contabilização dos efeitos globais de segunda ordem, muito próximo daquele obtido através do *ROBOT*. Para os casos estudados com paredes de contraventamento de edifícios regulares com 6, 10 e 15 pisos, as equações do Anexo H são válidas apresentando variações muito pouco significativas em relação aos valores de referência. De realçar apenas que os resultados obtidos pelas equações do Anexo H são ligeiramente contra a segurança, ou seja, os valores da carga global de encurvadura são maiores do que aqueles obtidos através do *ROBOT*, implicando fatores β menores. Este facto fará que, em fase de projeto, uma vez utilizada a metodologia preconizada no Anexo H do EC2, utilizada para a integração dos efeitos globais de segunda ordem nos esforços da estrutura, estes estarão ligeiramente subvalorizados.

Os desvios da carga global de encurvadura aumentaram da parede do edifício com 6 pisos para a parede do edifício com 10 pisos 1.27%, tendo diminuído desta última para a parede do edifício com 15 pisos 0.19%. Esta situação estará relacionada com magnitude das deformações globais de flexão e de esforço transversal. Ou seja, as deformações de esforço transversal ganham relevância entre as paredes de edifícios de 6 e 10 pisos, mas a partir de uma determinada altura as deformações globais de flexão tornam-se preponderantes. Assim sendo, as deformações de esforço transversal têm cada vez menos expressão na carga global de encurvadura.

O acréscimo do número de pisos, dentro do intervalo considerado, não implica uma variação linear do fator β como se pode observar na Figura 17. Nota-se que o desvio do fator β aumenta com o aumento do número de pisos do edifício em que estão inseridas as paredes de contraventamento. Estas diferenças, de 0.25%, entre as paredes de edifícios de 10 e 6 pisos e de 0.06%, entre as paredes de edifícios de 15 e 10 pisos poderão estar relacionadas com a diferença de alturas, visto que o Eurocódigo 2 não aponta qualquer tipo de indicação acerca do intervalo de validade para as alturas de edifícios às quais as equações possam ser aplicadas.

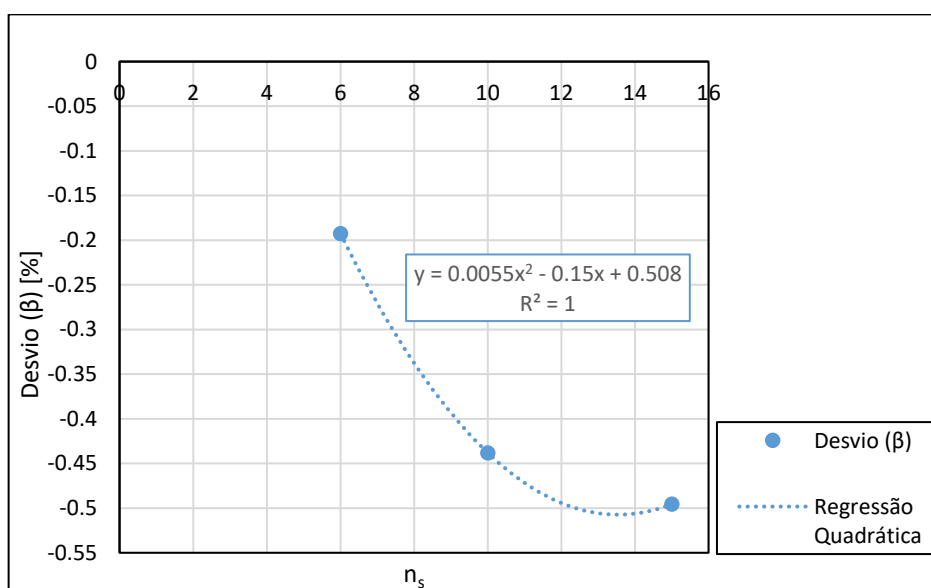


Figura 17 – Desvio (β) para paredes sem aberturas

4.3. PAREDES DE EDIFÍCIOS COM ABERTURAS

4.3.1. PAREDES DE EDIFÍCIOS DE 6 PISOS

A carga global de encurvadura para paredes com portas de edifícios de 6 pisos quando calculada tendo em conta apenas a flexão global, segundo a equação (2.3) apresenta desvios entre os 10 e 16% quando comparados com os valores obtidos através do programa de cálculo automático. Estes valores conduzem, genericamente a desvios do fator β superiores a 2.5% (ver Tabela 10).

Tabela 10 – Desvio 1 ($F_{V,B}$) e desvio 1 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 6 pisos

Parede	A_0 [m ²]	A_0/A [%]	$F_{V,BB}$ (H) [kN]	β ($F_{V,BB}$ (H))	$F_{V,B}$ (R) [kN]	β (R)	Desvio 1 ($F_{V,B}$) [%]	Desvio 1 (β) [%]
A.1.1	0.8x2.0	17.78	115368.60	1.222	104395.08	1.251	10.51	-2.33
A.1.2	1.0x2.0	22.22	113243.25	1.227	101009.15	1.262	12.11	-2.75
A.1.3	1.2x2.0	26.67	110072.37	1.235	94643.72	1.284	16.30	-3.83
A.2.1	0.8x0.8	7.11	115367.97	1.222	111700.58	1.231	3.28	-0.73
A.2.2	1.0x1.0	11.11	113243.25	1.227	109178.22	1.238	3.72	-0.85
A.2.3	1.2x1.2	16.00	110072.37	1.235	104077.53	1.252	5.76	-1.35
A.2.4	1.4x1.4	21.78	105647.10	1.248	96901.35	1.276	9.03	-2.23
A.2.5	1.6x1.6	28.44	99758.60	1.266	86642.96	1.319	15.14	-4.03

As janelas, em paredes de contraventamento de edifícios de 6 pisos, implicam desvios menores do fator β quando confrontadas com portas de igual área (ver Figura 18).

De notar na Figura 18, além dos desvios serem superiores nas paredes que possuem portas, estes vão-se aproximando dos obtidos para as paredes com janelas, à medida que a área da abertura aumenta. Esta situação sucede uma vez que o valor da largura vai aumentando para um valor de altura constante da porta, tendendo a assemelhar-se a uma janela, em que as duas dimensões assumem os mesmos valores.

De salientar que a secção utilizada para o cálculo do momento de inércia nas paredes com janelas retratará com maior fiabilidade o fenómeno de encurvadura do que a usada nas paredes com portas, isto porque, para paredes com janelas, o momento de inércia foi calculado para um referencial com origem no centro de gravidade do painel de parede, em que os três eixos cartesianos são eixos de simetria.

Os valores determinados para os desvios do fator β são negativos (ver Figura 18), pelo que o cálculo da carga global de encurvadura tendo em conta apenas a flexão pela equação (2.3) conduz a valores não conservativos para a grandeza em questão. Consequentemente, levarão a uma ligeira subvalorização dos efeitos globais de segunda ordem, apesar de não relevante, uma vez que os valores absolutos dos desvios são baixos e com pouco significado para o contexto em que surge.

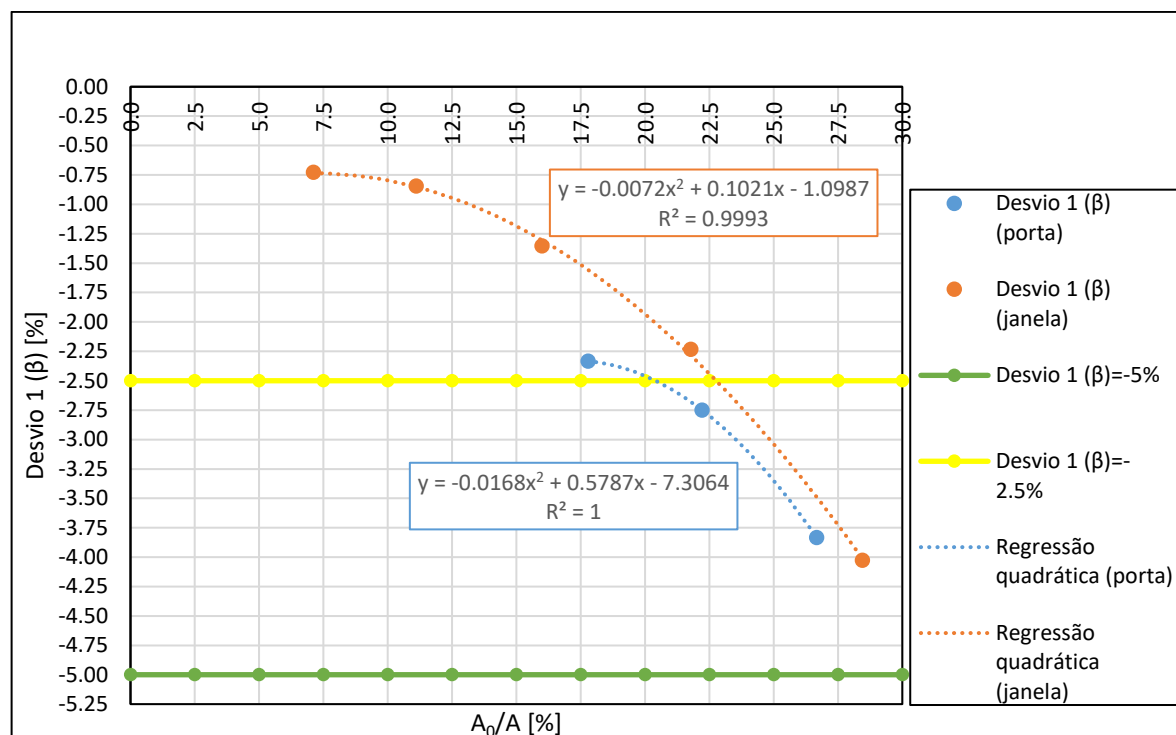


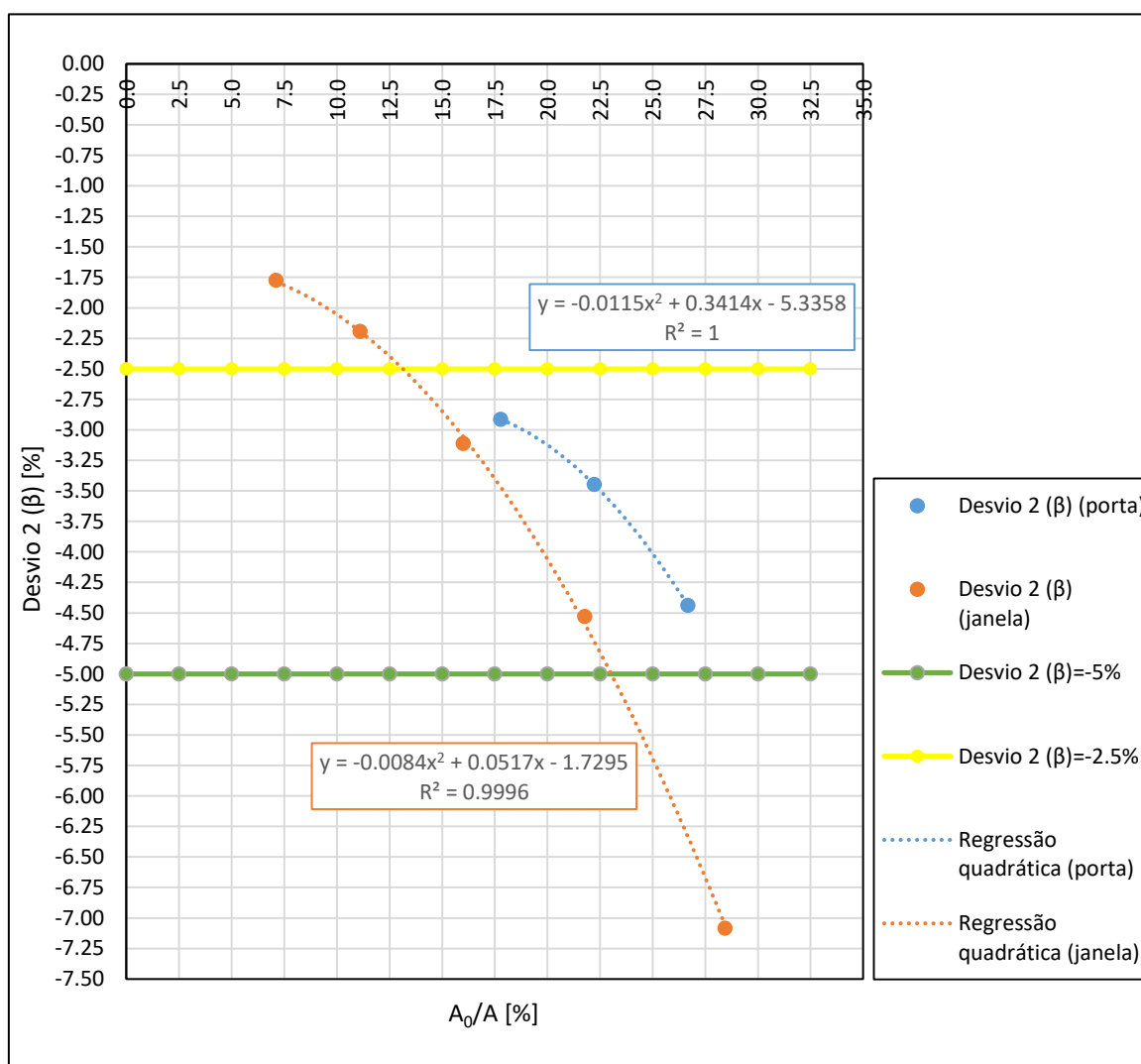
Figura 18 – Desvio 1 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 6 pisos

A partir de um rácio de áreas de 20 % as deformações de esforço transversal não deverão ser desprezadas, pelo que a carga global de encurvadura deverá ser calculada tendo em conta a flexão e o esforço transversal. Ou seja, uma vez utilizada a metodologia preconizada pelo EC2 no Anexo H, deverá ser utilizada a expressão (2.5) em detrimento da expressão (2.3).

A carga global de encurvadura para o esforço transversal é dada pela rigidez ao esforço transversal que é uma força por unidade de deformação angular ao nível do primeiro piso. Esta rigidez é maior nos elementos de contraventamento com portas, uma vez que para uma determinada área de abertura, a largura da mesma é menor em portas do que em janelas (ver Figura 20). Desta forma, as deformações de esforço transversal são mais significativas nas paredes com janelas, implicando maiores desvios do fator β quando este é determinado através das cargas de encurvadura calculadas pelas equações (2.3) e (2.5) (ver Tabela 11 e Figura 19). Ou seja, envolvendo apenas a flexão global ou tendo em conta a flexão e o esforço transversal globais.

Tabela 11 – Desvio 2 ($F_{V,B}$) e desvio 2 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 6 pisos

Parede	A_0 [m ²]	A_0/A [%]	$F_{V,BB}$ (H) [kN]	β ($F_{V,BB}$ (H))	$F_{V,B}$ (H) [kN]	β ($F_{V,B}$ (H))	Desvio 2 ($F_{V,B}$) [%]	Desvio 2 (β) [%]
A.1.1	0.8x2.0	17.78	115368.60	1.222	101982.94	1.26	13.13	-2.91
A.1.2	1.0x2.0	22.22	113243.25	1.227	98318.31	1.27	15.18	-3.45
A.1.3	1.2x2.0	26.67	110072.37	1.235	92595.57	1.29	18.87	-4.44
A.2.1	0.8X0.8	7.11	115367.97	1.222	106828.48	1.24	7.99	-1.77
A.2.2	1.0x1.0	11.11	113243.25	1.227	103273.10	1.25	9.65	-2.19
A.2.3	1.2x1.2	16.00	110072.37	1.235	97209.36	1.27	13.23	-3.11
A.2.4	1.4x1.4	21.78	105647.10	1.248	89305.83	1.31	18.30	-4.53
A.2.5	1.6x1.6	28.44	99758.60	1.266	78778.90	1.36	26.63	-7.08

Figura 19 – Desvio 2 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 6 pisos

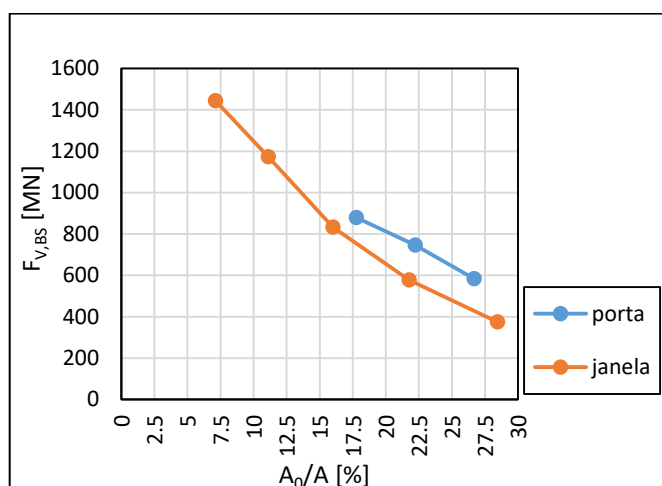


Figura 20 – Carga global de encurvadura para o esforço transverso de paredes de edifícios de 6 pisos

A carga global de encurvadura tendo em conta a flexão e o esforço transverso será o valor mais adequado para ser utilizado no cálculo de β , utilizando a metodologia preconizada no Anexo H do EC2. A utilização da equação (2.5) para o cálculo da carga global de encurvadura induz no fator de majoração das forças horizontais desvios positivos com valores baixos, ou seja, valores conservativos, mas que não comprometem a economia de uma solução de dimensionamento (ver Tabela 12 e Figura 21).

Em paredes com portas os desvios variam entre 0.6 e 0.75%, que são valores com pouco significado no contexto do problema (ver Figura 21).

Para estruturas de contraventamento com janelas com áreas superiores a 23% da área do painel da parede, os desvios provocados no fator de majoração das forças horizontais são superiores a 2.5%, com tendência a aumentarem com o aumento do rácio de áreas (ver Figura 21).

A equação (2.5) traduz com maior fiabilidade o fenómeno em paredes com portas do que em paredes com janelas, apesar de apresentar resultados muito razoáveis para os dois casos, como se pode constatar através dos valores obtidos para o desvio do fator de majoração das forças horizontais presentes na Tabela 12.

Tabela 12 – Desvio 3 ($F_{v,B}$) e desvio 3 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 6 pisos

Parede	A ₀ [m ²]	A ₀ /A [%]	F _{v,B} (R) [kN]	β (R)	F _{v,B} (H) [kN]	β (F _{v,B} (H))	Desvio 3 (F _{v,B}) [%]	Desvio 3 (β) [%]
A.1.1	0.8x2.0	17.78	104395.08	1.251	101982.94	1.26	-2.31	0.60
A.1.2	1.0x2.0	22.22	101009.15	1.262	98318.31	1.27	-2.66	0.72
A.1.3	1.2x2.0	26.67	94643.72	1.284	92595.57	1.29	-2.16	0.63
A.2.1	0.8X0.8	7.11	111700.58	1.231	106828.48	1.24	-4.36	1.06
A.2.2	1.0x1.0	0.00	109178.22	1.238	103273.10	1.25	-5.41	1.38
A.2.3	1.2x1.2	16.00	104077.53	1.252	97209.36	1.27	-6.60	1.81
A.2.4	1.4x1.4	21.78	96901.35	1.276	89305.83	1.31	-7.84	2.40
A.2.5	1.6x1.6	28.44	86642.96	1.319	78778.90	1.36	-9.08	3.29

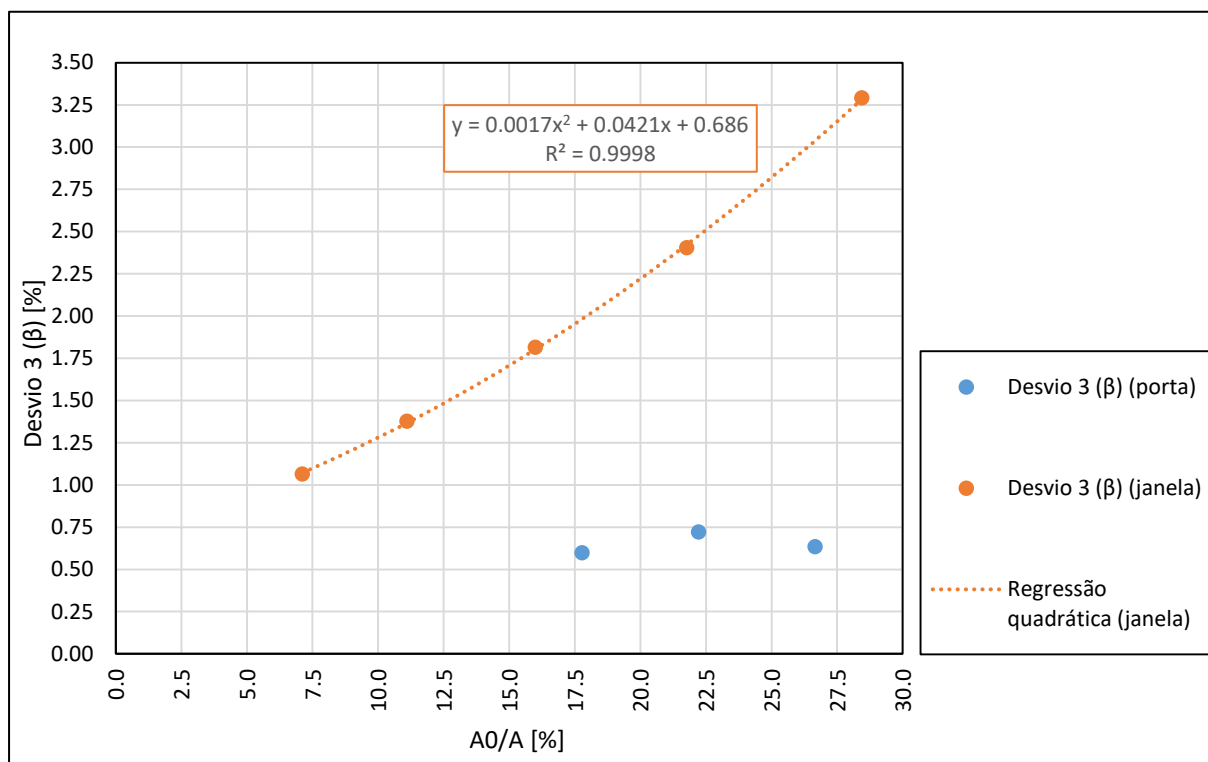


Figura 21 – Desvio 3 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 6 pisos

O desvio do fator β , quando este é determinado a partir das cargas globais de encurvadura calculadas pela equação (2.3) presente no Anexo H do EC2 e pelo programa de cálculo automático, são negativos, ou seja as calculadas a partir da equação são superiores às dadas pelo *ROBOT*. O contrário sucede quando, em substituição da equação (2.3), é utilizada a equação (2.5) (ver Figura 22).

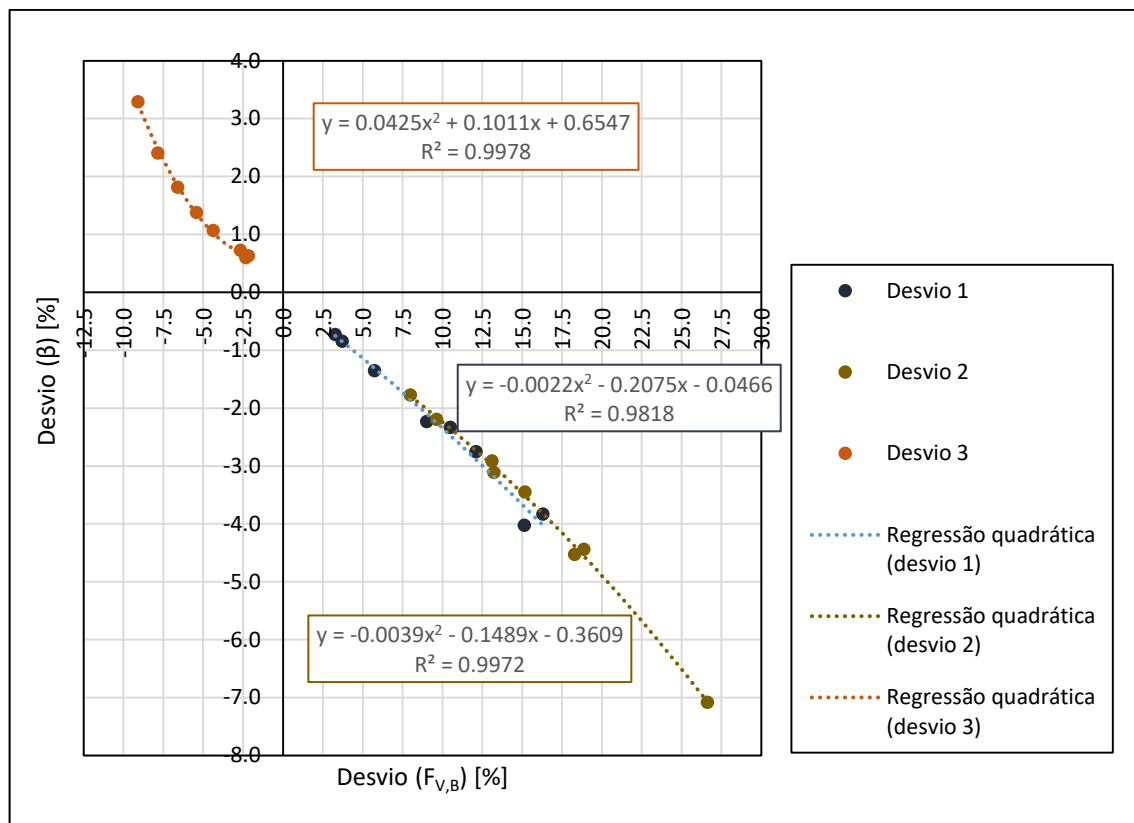


Figura 22 – Relação entre desvios (F_{V,B}) e desvios (β) para parede de edifícios de 6 pisos

• Comentários

As paredes de edifícios de 6 pisos com aberturas, em que estas são portas, têm desvios maiores entre as cargas globais de encurvadura para a flexão global e a carga global de encurvadura tendo em conta a flexão e o esforço transversal do que as paredes com janelas da mesma área. As deformações de esforço transversal são maiores nas que têm janelas, existindo por isso uma maior necessidade de utilização da expressão (2.11), presente no Anexo H do EC2, nestes casos.

Tomando como referência o gráfico da Figura 18 e assumindo como admissível um desvio percentual de 2%, para uma estrutura de contraventamento com aberturas, em que estas têm uma área superior a 20 % da área da parede cheia, deverá ser considerada a carga global de encurvadura para o esforço transversal, utilizando desta forma a equação (2.5) para o cálculo da carga global de encurvadura. Consequentemente não serão desprezadas as deformações de esforço transversal e, serão obtidos menores valores para a carga global de encurvadura e maiores valores para o fator β.

De salientar que todos os resultados obtidos para o fator β com carga global de encurvadura calculada pela equação (2.5) são conservativos e pouco desfasados dos obtidos com a carga global de encurvadura calculada automaticamente pelo *ROBOT*.

4.3.2. PAREDES DE EDIFÍCIOS DE 10 PISOS

A presença de diferentes aberturas, sejam elas portas ou janelas, não implica um comportamento estrutural, relativamente à encurvadura, muito díspar quando as correspondentes áreas forem similares (ver Tabela 13 e Figura 23). Os valores para a carga global nominal de encurvadura para a flexão global

e para a carga global de encurvadura determinada através do *ROBOT* não se distinguem muito entre estruturas de contraventamento com portas e estruturas de contraventamento com janelas.

Para áreas de aberturas superiores a 17.0% da área do painel os desvios do fator β são negativos e superiores a 2.5 %, em valor absoluto, levando a uma subvalorização dos efeitos globais de segunda ordem (ver Figura 23).

Quando introduzidas duas aberturas em cada painel constituinte da parede, o desvio do fator β é inferior a 1.0%, bastante menor do que quando comparado com as estruturas de contraventamento com uma janela ou uma porta com o mesmo rácio de áreas (ver Tabela 13 e Figura 23).

Tabela 13 – Desvio 1 ($F_{V,B}$) e desvio 1 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 10 pisos

Parede	A_0 [m ²]	A_0/A [%]	$F_{V,BB}$ (H) [kN]	$\beta(F_{V,BB}$ (H))	$F_{V,B}$ (R) [kN]	β (R)	Desvio 1 ($F_{V,B}$) [%]	Desvio 1 (β) [%]
D.1.1	1.0x2.0	13.33	212308.40	1.205	195864.67	1.226	8.40	-1.72
D.1.2	1.4x2.0	18.67	209322.41	1.209	185266.46	1.242	12.98	-2.71
D.1.3	2.0x2.0	26.67	200323.28	1.220	167644.79	1.275	19.49	-4.29
D.2.1	1.0x1.0	6.67	212308.16	1.205	204702.05	1.214	3.72	-0.76
D.2.2	1.4x1.4	13.07	209322.41	1.209	196654.61	1.225	6.44	-1.34
D.2.3	2.0x2.0	26.67	200323.28	1.220	164533.09	1.281	21.75	-4.78
D.3.1	1.0x2.0 1.0x1.0	20.00	169504.31	1.271	163819.00	1.283	3.47	-0.94

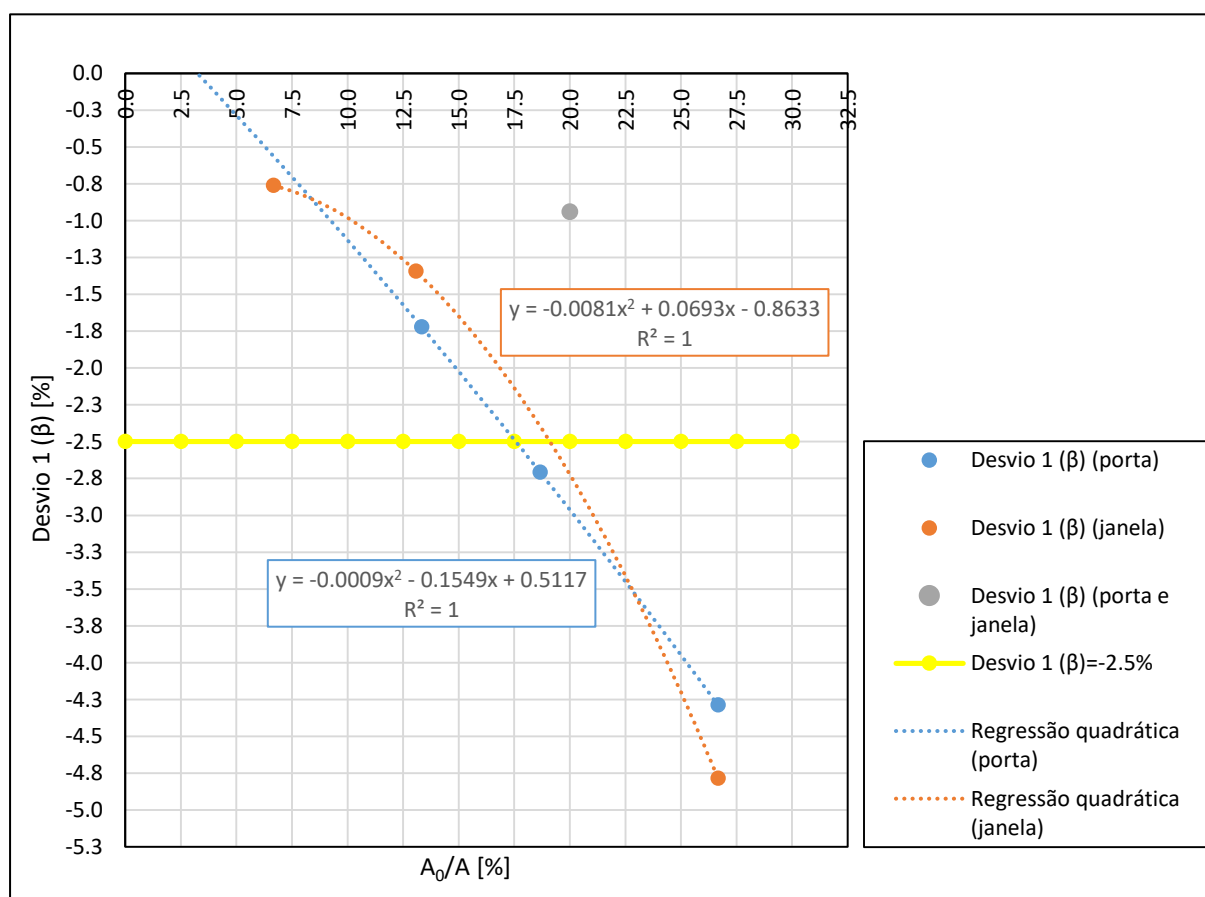
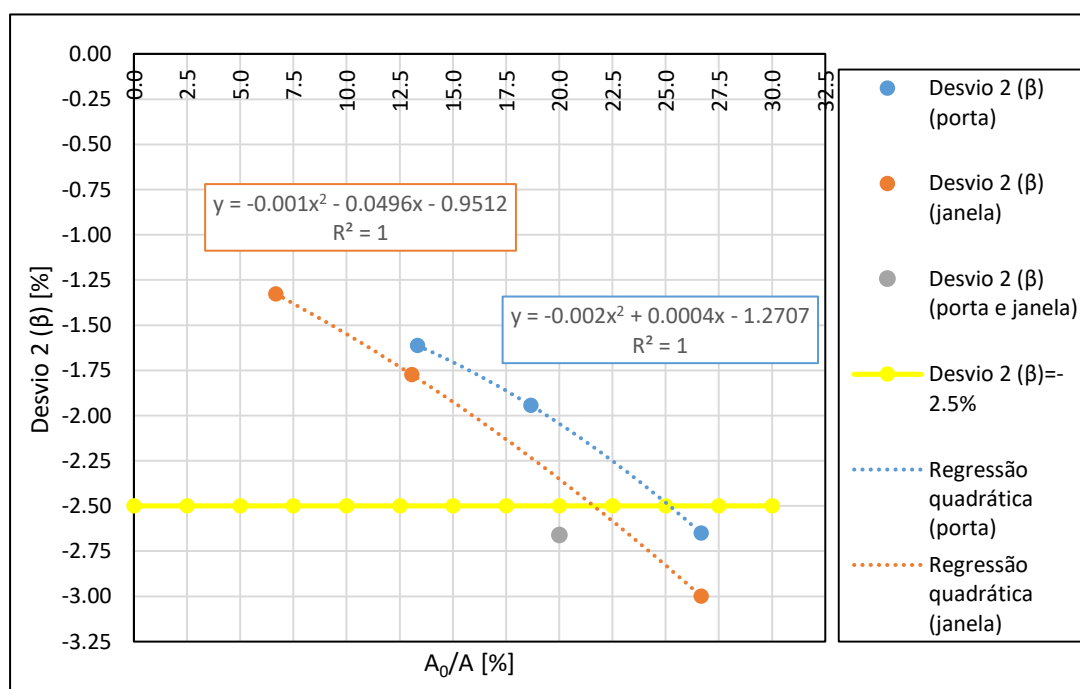


Figura 23 – Desvio 1 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 10 pisos

Os desvios 2 do fator β são relativamente maiores em estruturas de contraventamento com janelas do que em estruturas de contraventamento com portas uma vez que a carga global de encurvadura para o esforço transversal, ou seja, a rigidez ao esforço transversal, é maior nas paredes com portas do que nas com janelas (Tabela 14, Figura 24 e Figura 25). Para a parede estrutural com duas aberturas, uma porta e uma janela, as deformações de esforço transversal são ainda mais significativas, implicando desta forma uma maior desvio no fator de majoração das forças horizontais, como meio de cálculo dos efeitos globais de segunda ordem (Figura 24).

Tabela 14 – Desvio 2 ($F_{V,B}$) e desvio 2 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 10 pisos

Parede	A_0 [m ²]	A_0/A [%]	$F_{V,BB}$ (H) [kN]	β ($F_{V,BB}$ (H))	$F_{V,B}$ (H) [kN]	β ($F_{V,B}$ (H))	Desvio 2 ($F_{V,B}$) [%]	Desvio 2 (β) [%]
D.1.1	1.0x2.0	13.33	212308.40	1.205	196821.69	1.225	7.87	-1.61
D.1.2	1.4x2.0	18.67	209322.41	1.209	191470.18	1.233	9.32	-1.94
D.1.3	2.0x2.0	26.67	200323.28	1.220	178788.32	1.253	12.04	-2.65
D.2.1	1.0x1.0	6.67	212308.16	1.205	199399.46	1.221	6.47	-1.33
D.2.2	1.4x1.4	13.07	209322.41	1.209	192915.23	1.230	8.50	-1.77
D.2.3	2.0x2.0	26.67	200323.28	1.220	176290.48	1.258	13.63	-3.00
D.3.1	1.0x2.0 1.0x1.0	20.00	169504.31	1.271	154343.14	1.306	9.82	-2.66

Figura 24 – Desvio 2 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 10 pisos

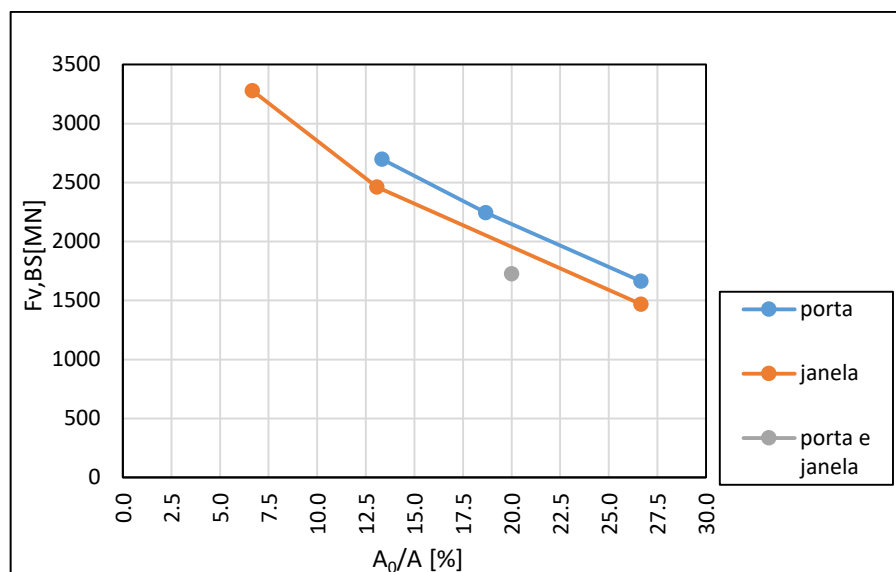


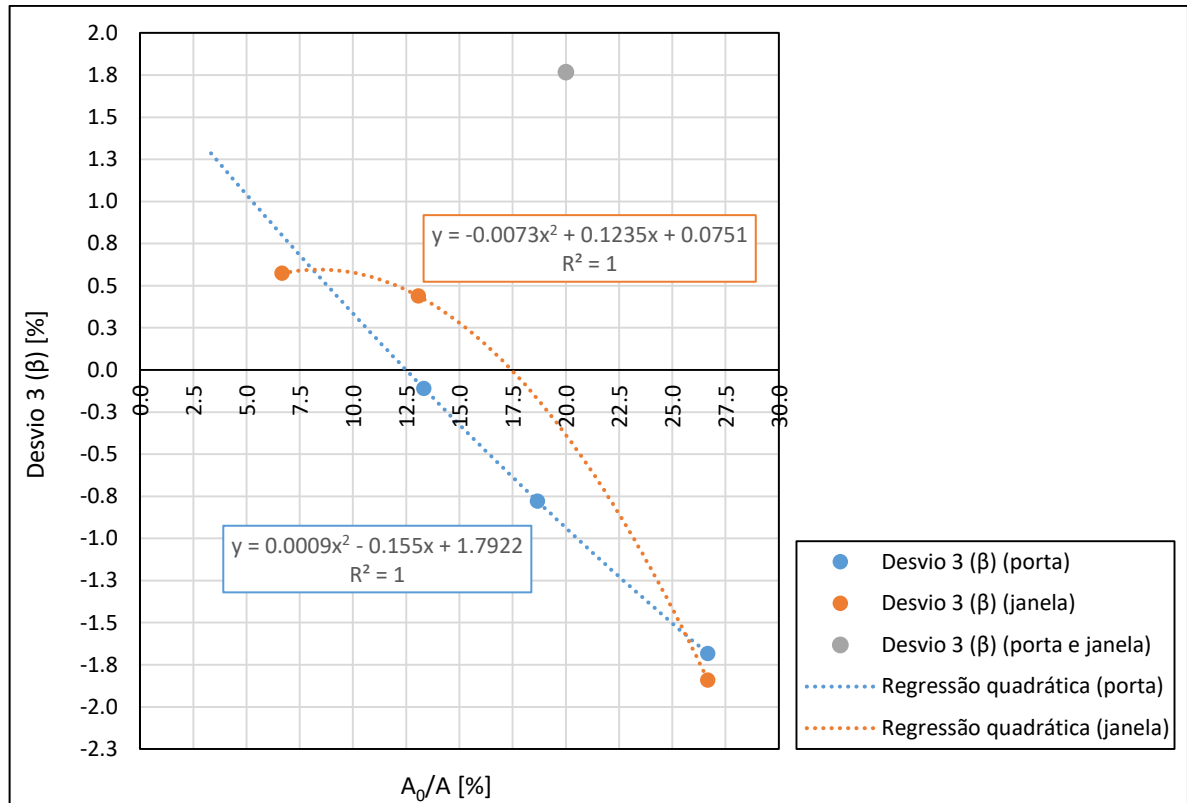
Figura 25 – Carga global de encurvadura para o esforço transversal de edifícios de 10 pisos

Em paredes com aberturas de pequena área, abaixo dos 12.5% da área do painel não vazado para estruturas de contraventamento com portas e, 17.5% para estruturas de contraventamento com janelas, o desvio percentual entre o fator determinado com a carga global de encurvadura calculada pela equação (2.5) e a obtida através do programa de cálculo automático são desprezáveis visto que, além do seu valor absoluto ser baixo, são valores positivos, ou seja, conservativos, não comprometendo a segurança e a economia das soluções (ver Tabela 15 e Figura 26).

Para valores de áreas de aberturas superiores aos atrás mencionados, os desvios são negativos, ou seja, contra a segurança, apesar de que em valor absoluto, não ultrapassam os 2%. Ou seja, são valores com muito pouco significado no contexto do problema, pelo que, poderá dizer-se que a equação (2.5) presente no Anexo H do EC2 dará uma boa estimativa para o valor da carga global de encurvadura de paredes com aberturas de edifícios de 10 pisos (ver Figura 26).

Tabela 15 – Desvio 3 ($F_{v,B}$) e desvio 3 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 10 pisos

Parede	A_0 [m ²]	A_0/A [%]	$F_{v,B}$ (R) [kN]	β (R)	$F_{v,B}$ (H) [kN]	β ($F_{v,B}$ (H))	Desvio 3 ($F_{v,B}$) [%]	Desvio 3 (β) [%]
D.1.1	1.0x2.0	13.33	195864.67	1.226	196821.69	1.225	0.49	-0.11
D.1.2	1.4x2.0	18.67	185266.46	1.242	191470.18	1.233	3.35	-0.78
D.1.3	2.0x2.0	26.67	167644.79	1.275	178788.32	1.253	6.65	-1.68
D.2.1	1.0x1.0	6.67	204702.05	1.214	199399.46	1.221	-2.59	0.57
D.2.2	1.4x1.4	13.07	196654.61	1.225	192915.23	1.230	-1.90	0.44
D.2.3	2.0x2.0	26.67	164533.09	1.281	176290.48	1.258	7.15	-1.84
D.3.1	1.0x2.0 1.0x1.0	20.00	163819.00	1.283	154343.14	1.306	-5.78	1.77

Figura 26 – Desvio 3 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 10 pisos

Em paredes de 10 pisos, os desvios do fator β , quando é desprezada a rigidez ao esforço transversal, são negativos (ver Figura 27), implicando estimativas para a quantificação dos efeitos globais de segunda ordem em prejuízo da segurança. Após a consideração da carga global de encurvadura para o esforço transversal através da equação (2.5), as regressões que caracterizavam os desvios 1 (β) sofrem uma translação (ver Figura 27), reduzindo substancialmente, em módulo, alguns dos valores negativos mais preocupantes e, para áreas de aberturas mais pequenas, os desvios são positivos, contribuindo desta forma para um admissível, cálculo conservativo dos efeitos globais de segunda ordem.

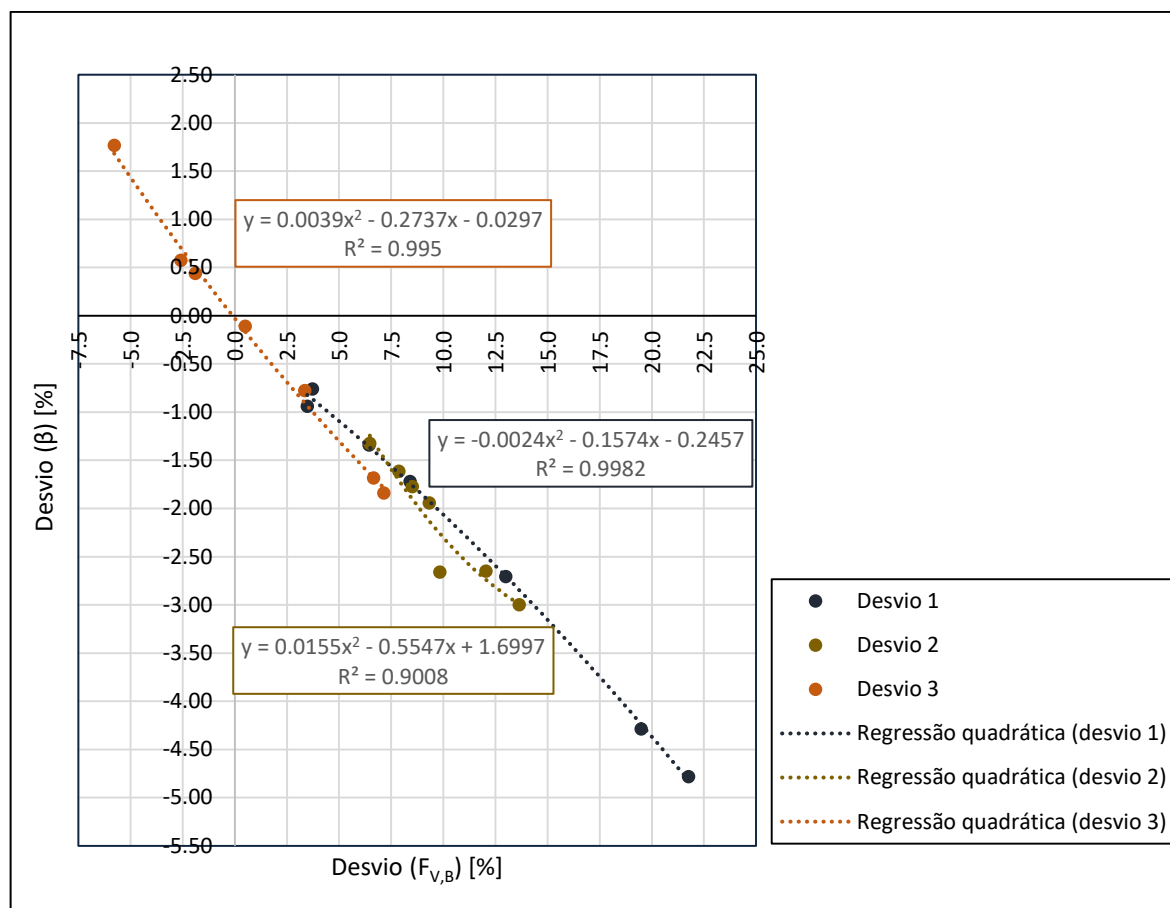


Figura 27 – Relação entre os desvios ($F_{v,B}$) e os desvios (β) para paredes de edifícios de 10 pisos

• Comentários

As paredes de 10 pisos com portas ou janelas apresentam cargas globais de encurvadura para a flexão global muito próximas e, cargas globais de encurvadura para o esforço transversal não muito díspares. A consideração da rigidez de esforço transversal na expressão (2.5) reduz os desvios do fator β de forma considerável, sendo que o maior desvio, no valor de -4.78% quando se considera só a flexão global, reduz-se para -1.84%, apesar de manter-se um valor ligeiramente não conservativo.

As aberturas, de áreas superiores a 17.5 % da área do painel, induzem, genericamente, desvios no fator de majoração das forças horizontais superiores a 2.5% de forma ligeiramente não conservativa, quando utilizados os valores das cargas globais de encurvadura dados pela equação (2.3) e pelo *ROBOT*, pelo que a partir deste rácio de áreas, 17.5%, a carga global de encurvadura para o esforço transversal deve ser introduzida na carga global de encurvadura. Desta forma, utilizando a metodologia preconizada no Anexo H do Eurocódigo 2, deverá utilizar-se a equação (2.5) em detrimento da equação (2.3).

A equação (2.5) permite a determinação de valores para a carga global de encurvadura tendo em conta a flexão e o esforço transversal muito próximos dos obtidos pelo programa de cálculo estrutural, uma vez que os desvios induzidos no fator β não se quantificam em valores superiores a 2%, apesar de que para áreas de aberturas superiores a 13% os efeitos globais de segunda ordem serão subvalorizados, pois os desvios para os diferentes valores de β são valores negativos.

4.3.3. PAREDES DE EDIFÍCIOS DE 15 PISOS

Os desvios do fator β para paredes de 15 pisos com uma porta ou uma janela são praticamente coincidentes. Para áreas de aberturas entre os 5 e os 30 % da área do painel, a determinação da carga global de encurvadura pela expressão (2.3) conduz à sobrevalorização da mesma, prejudicando desta forma a segurança (ver Tabela 16 e Figura 28).

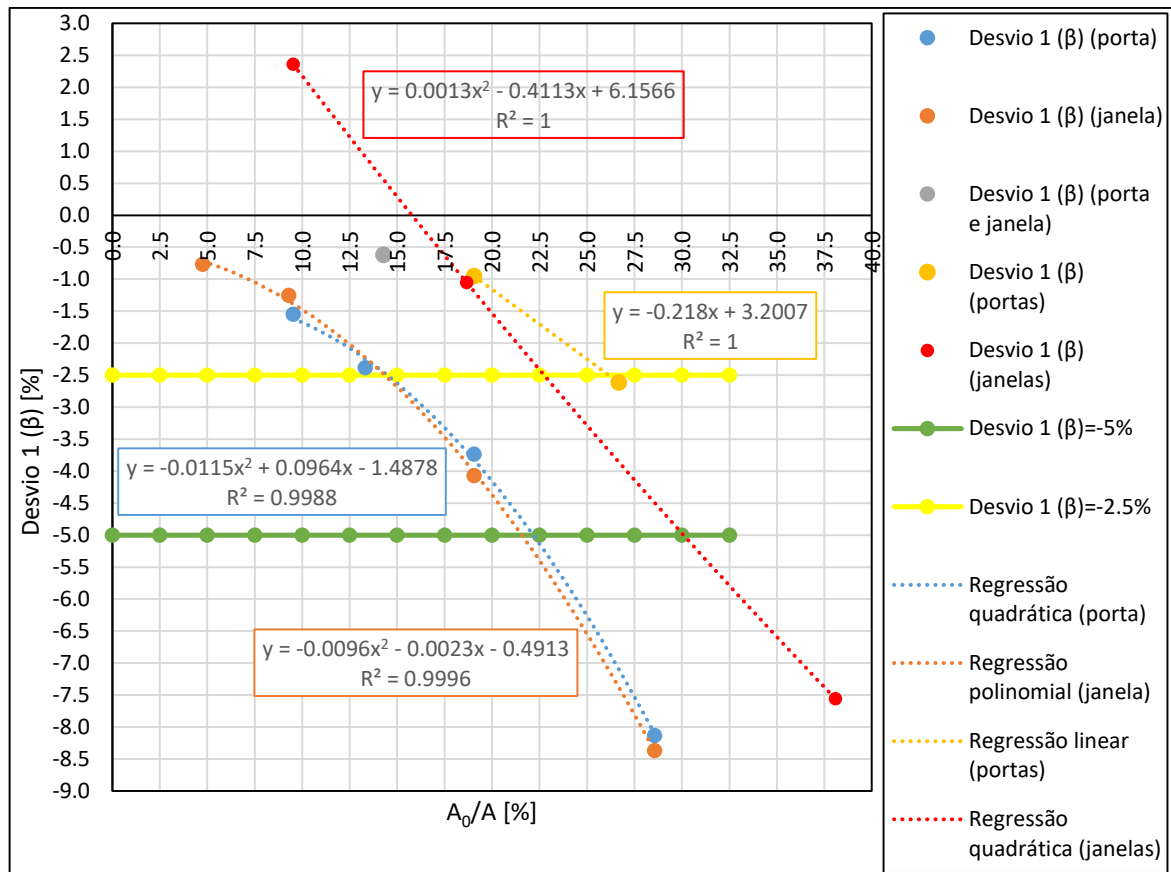
Para paredes com apenas uma abertura, em que esta representa 12.5% ou mais da área do painel da parede sem abertura, os desvios são negativos, e superiores a 2.5% em valor absoluto. Desta forma o cálculo da carga de encurvadura tendo em conta apenas a flexão simples, pela equação (2.3), não será a metodologia adequada para o cálculo dos efeitos globais de segunda ordem (ver Figura 28).

As paredes de 15 pisos que contêm duas aberturas, sejam elas duas portas, duas janelas, ou uma porta e janela, têm, em valor absoluto, desvios do fator de majoração das forças horizontais bastante menores. De salientar que, para áreas de aberturas, quando estas são duas janelas, inferiores a 15%, os desvios são positivos e têm valores relativamente reduzidos (ver Figura 28).

Relativamente aos casos estudados, as paredes que continham duas portas têm associadas as diferenças mais pequenas entre a carga global de encurvadura calculada pela equação (2.3) e o valor obtido pelo *ROBOT* (ver Tabela 16).

Tabela 16 – Desvio 1 ($F_{V,B}$) e desvio 1 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 15 pisos

Parede	A_0 [m ²]	A_0/A [%]	$F_{V,BB}$ (H) [kN]	β ($F_{V,BB}$ (H))	$F_{V,B}$ (R) [kN]	β (R)	Desvio 1 ($F_{V,B}$) [%]	Desvio 1 (β) [%]
G.1.1	1.0x2.0	9.52	272791.16	1.253	257066.11	1.273	6.12	-1.55
G.1.2	1.4x2.0	13.33	271400.10	1.255	248174.16	1.285	9.36	-2.38
G.1.3	2.0x2.0	19.05	267207.85	1.260	233591.94	1.308	14.39	-3.74
G.1.4	3.0x2.0	28.57	252052.64	1.280	195240.37	1.393	29.10	-8.13
G.1.5	1.0x2.0 1.0x2.0	19.05	195420.70	1.392	190793.57	1.406	2.43	-0.95
G.1.6	1.4x2.0 1.4x2.0	26.67	182377.64	1.433	171987.57	1.471	6.04	-2.61
G.2.1	1.0x1.0	4.76	272791.16	1.253	264738.30	1.263	3.04	-0.77
G.2.2	1.4x1.4	9.30	271400.10	1.255	258681.83	1.270	4.92	-1.25
G.2.3	2.0x2.0	19.05	267207.85	1.260	230971.21	1.313	15.69	-4.07
G.2.4	3.0x2.0	28.57	252052.53	1.280	193985.35	1.396	29.93	-8.37
G.2.5	1.0x1.0 1.0x1.0	9.52	195420.70	1.392	207935.38	1.360	-6.02	2.36
G.2.6	1.4x1.4 1.4x1.4	18.67	216682.33	1.341	210182.74	1.355	3.09	-1.05
G.2.7	2.0x2.0 2.0x2.0	38.10	174682.06	1.460	150041.00	1.580	16.42	-7.56
G.3.1	1.0x1.0 1.0x2.0	14.29	228921.37	1.317	224539.18	1.325	1.95	-0.62

Figura 28 – Desvio 1 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 15 pisos

As paredes de edifícios de 15 pisos com uma abertura, seja ela uma porta ou uma janela, têm valores para a carga global de encurvadura para o esforço transversal muito próximos (ver Figura 30). Para estes casos de estudo, a grandeza dos desvios do fator de majoração das forças horizontais calculados a partir da carga global de encurvadura pelas equações (2.3) e (2.5) não apresentam relevância no contexto da situação em estudo (ver Tabela 17 e Figura 29). Os desvios apenas tomam valores superiores a 2.5% para estruturas de contraventamento com aberturas superiores a 27.5% da área do painel (ver Figura 29). Desta forma, para paredes com apenas uma abertura, as deformações de esforço transversal são pouco significativas, não sendo necessariamente relevante a utilização da equação (2.3) em lugar da equação (2.5), uma vez que seja utilizada a metodologia descrita no Anexo H do EC2.

Tabela 17 – Desvio 2 ($F_{V,B}$) e desvio 2 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 15 pisos

Parede	A_0 [m ²]	A_0/A [%]	$F_{V,BB}$ (H) [kN]	β ($F_{V,BB}$ (H))	$F_{V,B}$ (H) [kN]	β ($F_{V,B}$ (H))	Desvio 2 ($F_{V,B}$) [%]	Desvio 2 (β) [%]
G.1.1	1.0x2.0	9.52	272791.16	1.253	258602.41	1.271	5.49	-1.39
G.1.2	1.4x2.0	13.33	271400.10	1.255	255947.16	1.274	6.04	-1.54
G.1.3	2.0x2.0	19.05	267207.85	1.260	249913.44	1.283	6.92	-1.80
G.1.4	3.0x2.0	28.57	252052.64	1.280	230607.46	1.314	9.30	-2.60
G.1.5	1.0x2.0 1.0x2.0	19.05	195420.70	1.392	185087.11	1.424	5.58	-2.19
G.1.6	1.4x2.0 1.4x2.0	26.67	182377.64	1.433	170016.86	1.479	7.27	-3.14
G.2.1	1.0x1.0	4.76	272791.16	1.253	260098.75	1.269	4.88	-1.23
G.2.2	1.4x1.4	9.30	271400.10	1.255	256716.91	1.273	5.72	-1.46
G.2.3	2.0x2.0	19.05	267207.85	1.260	248871.42	1.284	7.37	-1.91
G.2.4	3.0x2.0	28.57	252052.53	1.280	229036.36	1.317	10.05	-2.81
G.2.5	1.0x1.0 1.0x1.0	9.52	195420.70	1.392	187428.16	1.416	4.26	-1.67
G.2.6	1.4x1.4 1.4x1.4	18.67	216682.33	1.341	200588.33	1.378	8.02	-2.73
G.2.7	2.0x2.0 2.0x2.0	38.10	174682.06	1.460	148750.06	1.588	17.43	-8.03
G.3.1	1.0x1.0 1.0x2.0	14.29	228921.37	1.317	215973.22	1.342	6.00	-1.90

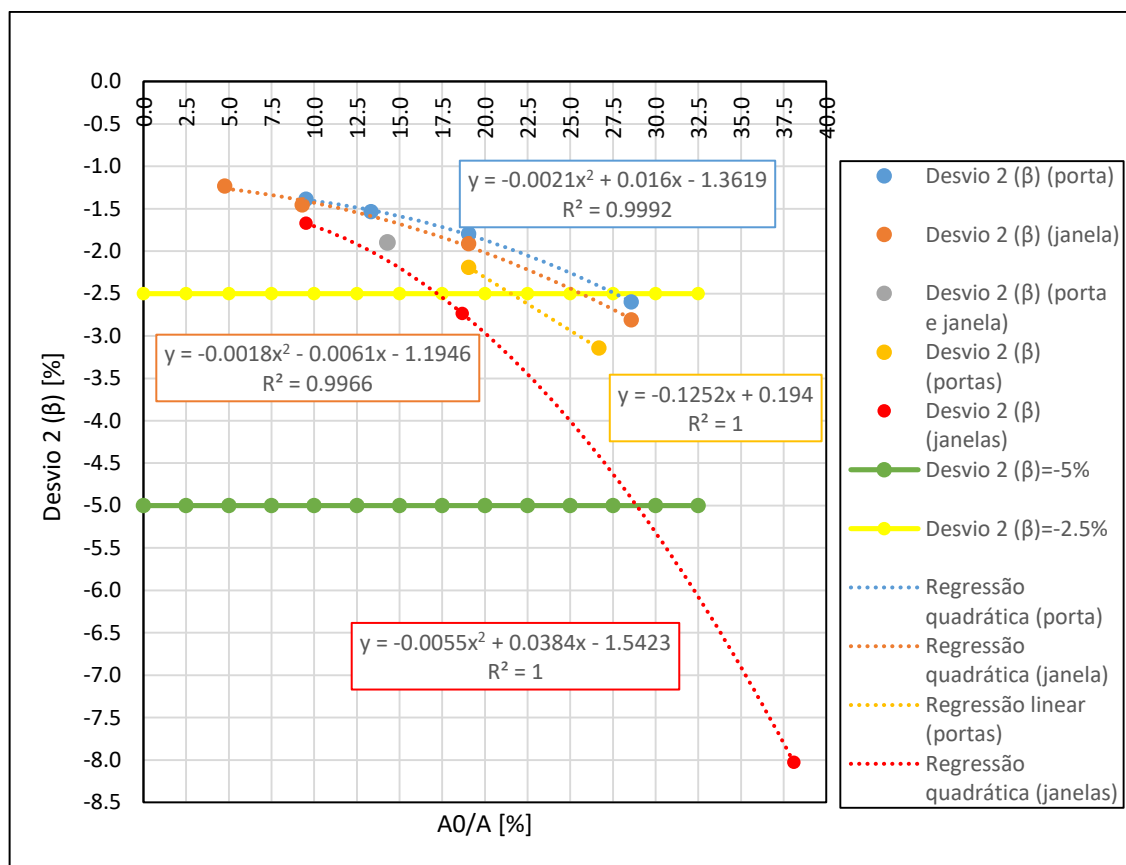


Figura 29 – Desvio 2 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 15 pisos

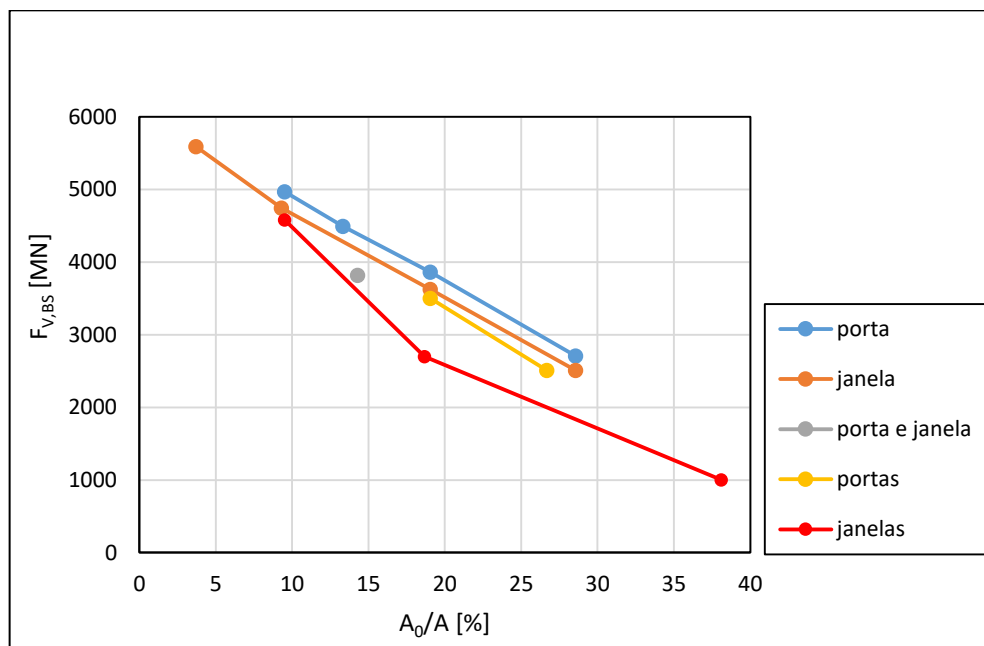


Figura 30 – Carga global de encurvadura para o esforço transverso para parede de edifícios de 15 pisos

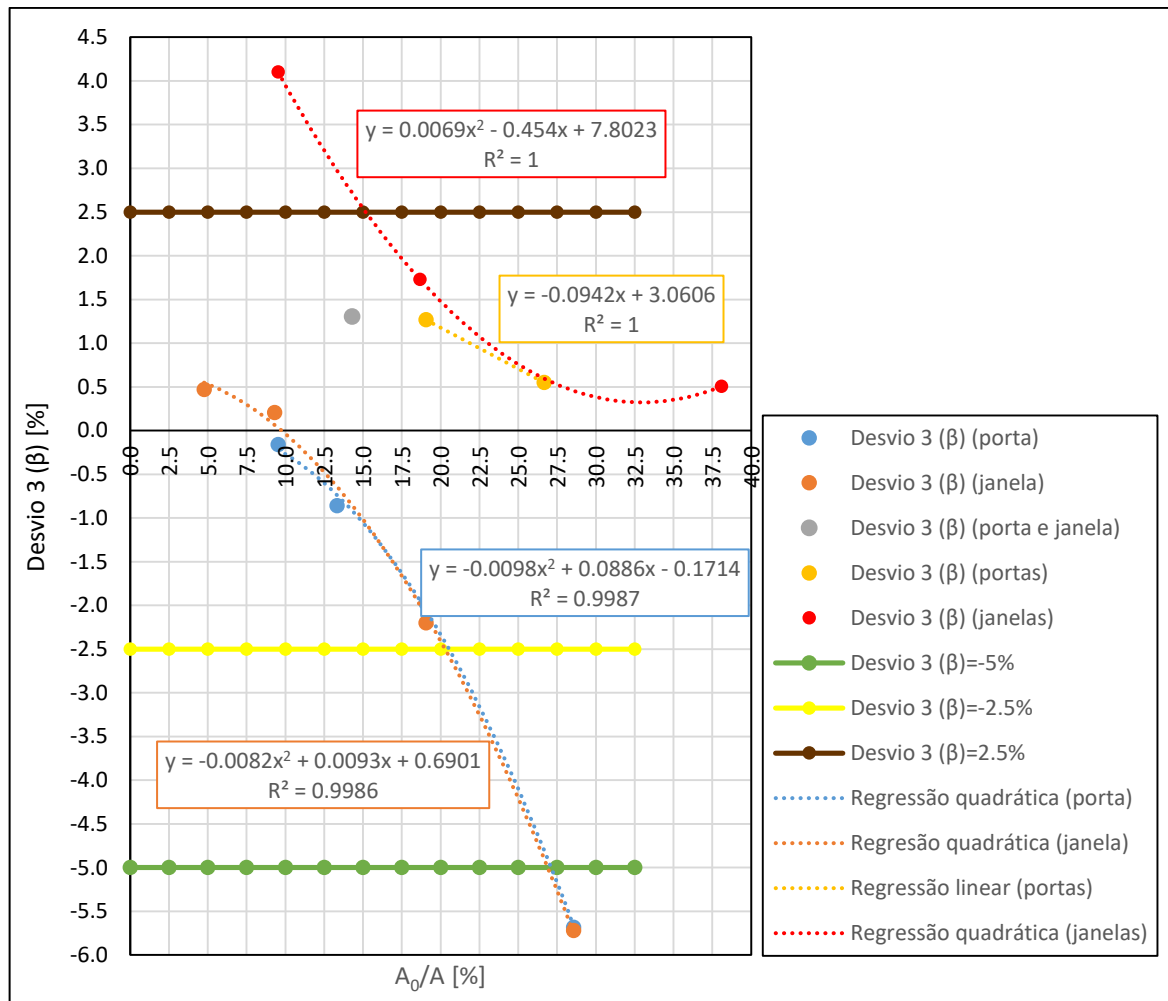
As paredes de 15 pisos que têm apenas uma abertura em cada painel, com uma área entre os 5 e os 30% da área não vazada do painel, apresentam desvios do fator β entre os +0.5% e os -6 % (ver Tabela 18). Para áreas de aberturas superiores a 20% os desvios são negativos, e superiores, em valor absoluto a 2.5%. Ou seja, para estes casos a equação (2.5) presente no Anexo H do Eurocódigo 2 retratar o fenómeno com menos precisão, podendo até, estar do lado da insegurança (ver Figura 31).

Em paredes com duas aberturas os desvios do fator β são positivos, ou seja conservativos, permitindo uma pequena sobrevalorização dos efeitos globais de segunda ordem (ver Tabela 18 e Figura 31).

Para paredes com apenas uma abertura em edifícios de 15 pisos, seja ela uma porta ou uma janela, com uma área superior a 27.5% da área do painel não vazado, a metodologia preconizada pelo EC2 no Anexo H deve ser utilizada com precaução. Esta preocupação surge na medida em que, utilizando a equação (2.5) ao invés da (2.3) para o cálculo da carga global de encurvadura, os desvios do fator de majoração das cargas horizontais, para contabilização dos efeitos globais de segunda ordem, tomem valores superiores a 5%, contra a segurança, ou seja, promovem um subdimensionamento (ver Figura 31).

Tabela 18 – Desvio 3 ($F_{V,B}$) e desvio 3 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 15 pisos

Parede	A_0 [m ²]	A_0/A [%]	$F_{V,B}(R)$ [kN]	$\beta(R)$	$F_{V,B}(H)$ [kN]	β ($F_{V,B}(H)$)	Desvio 3 ($F_{V,B}$) [%]	Desvio 3 (β) [%]
G.1.1	1.0x2.0	9.52	257066.11	1.273	258602.41	1.271	0.60	-0.16
G.1.2	1.4x2.0	13.33	248174.16	1.285	255947.16	1.274	3.13	-0.86
G.1.3	2.0x2.0	19.05	233591.94	1.308	249913.44	1.283	6.99	-1.97
G.1.4	3.0x2.0	28.57	195240.37	1.393	230607.46	1.314	18.11	-5.68
G.1.5	1.0x2.0 1.0x2.0	19.05	190793.57	1.406	185087.11	1.424	-2.99	1.27
G.1.6	1.4x2.0 1.4x2.0	26.67	171987.57	1.471	170016.86	1.479	-1.15	0.55
G.2.1	1.0x1.0	4.76	264738.30	1.263	260098.75	1.269	-1.75	0.47
G.2.2	1.4x1.4	9.30	258681.83	1.270	256716.91	1.273	-0.76	0.21
G.2.3	2.0x2.0	19.05	230971.21	1.313	248871.42	1.284	7.75	-2.20
G.2.4	3.0x2.0	28.57	193985.35	1.396	229036.36	1.317	18.07	-5.72
G.2.5	1.0x1.0 1.0x1.0	9.52	207935.38	1.360	187428.16	1.416	-9.86	4.10
G.2.6	1.4x1.4 1.4x1.4	18.67	210182.74	1.355	200588.33	1.378	-4.56	1.73
G.2.7	2.0x2.0 2.0x2.0	38.10	150041.00	1.580	148750.06	1.588	-0.86	0.51
G.3.1	1.0x1.0 1.0x2.0	14.29	224539.18	1.325	215973.22	1.342	-3.81	1.31

Figura 31 – Desvio 3 (β) para paredes com aberturas de edifícios de 15 pisos

• Comentários

Em edifícios de 15 pisos com paredes de contraventamento com aberturas não existe uma grande necessidade de clarificar o tipo de abertura, porta ou janela, uma vez que, apresentam um comportamento muito semelhante. Ou seja, quando, em cada painel da estrutura de contraventamento existe uma abertura, a carga global de encurvadura para a flexão simples e a carga de encurvadura para o esforço transversal não diferem muito consoante a abertura seja uma porta ou uma janela da mesma área.

Quando a abertura tem uma área de 15% da área do painel sem aberturas deve ser utilizada a equação (2.5) em detrimento da (2.3), uma vez adotada a metodologia preconizada no Anexo H do EC2.

A existência de duas aberturas em cada painel constituinte da estrutura de contraventamento provoca uma diminuição dos desvios 1 e 3 do fator de majoração das forças horizontais, β , e uma passagem, de muitos deles, para o lado conservativo. Ou seja, quando numa parede existem duas aberturas, que em conjunto perfazem uma área igual ao de única abertura numa parede com as mesmas características, o desvio de β para a primeira é menor, em valor absoluto, do que o da segunda, ou o da primeira é positivo e o da segunda é negativo.

Quando as duas aberturas totalizam uma área superior ao igual a 22.5% da área do painel deverá ser utilizada a equação (2.5) em substituição da (2.3) presente no Anexo H do EC2.

4.3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os desvios do fator β quando este é determinado através da carga global nominal de encurvadura para a flexão global, $F_{V,BB}$ e através do programa de cálculo automático, *ROBOT*, são negativos, excetuando um caso em que se verificou o contrário. Os desvios tendem a situar-se entre -0.5 e -5% (ver Figura 32).

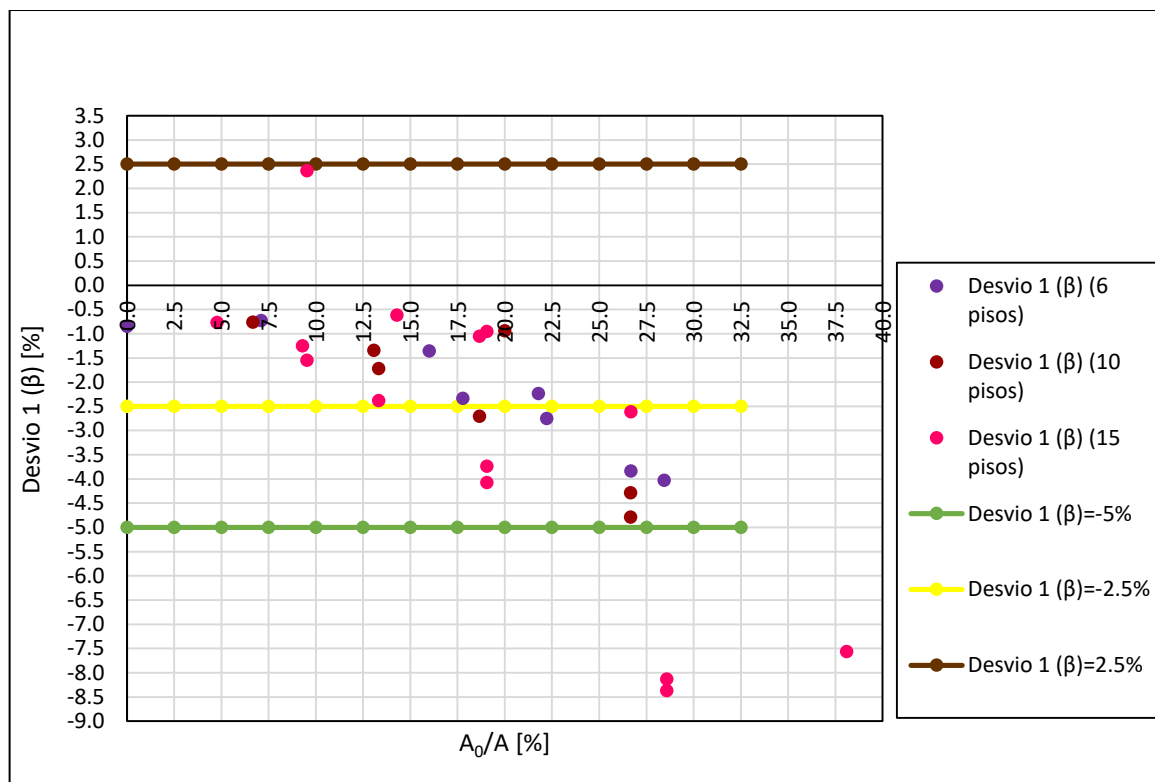


Figura 32 – Desvio 1 (β) para paredes com aberturas de edifícios com 6, 10 e 15 pisos

Os desvios do fator β quando este é determinado através da carga global nominal de encurvadura para a flexão global pela equação (2.3) ou através da carga global de encurvadura tendo em conta a flexão e o esforço transverso globais pela equação (2.5) são negativos, ou seja, induzem uma subvalorização dos efeitos globais de segunda ordem quando estes são determinados a partir da carga global nominal de encurvadura para a flexão global (ver Figura 33). Observa-se que o número de pisos do edifício e o desvio do fator de majoração das forças horizontais, em valor absoluto, são variáveis que evoluem inversamente, ou seja, à medida que o número de pisos aumenta o desvio de β diminui (Figura 33). Poderá dizer-se então, como era esperado, que com o aumento em altura do edifício as deformações de esforço transversal tendem a perder significado, salientando-se as deformações de flexão.

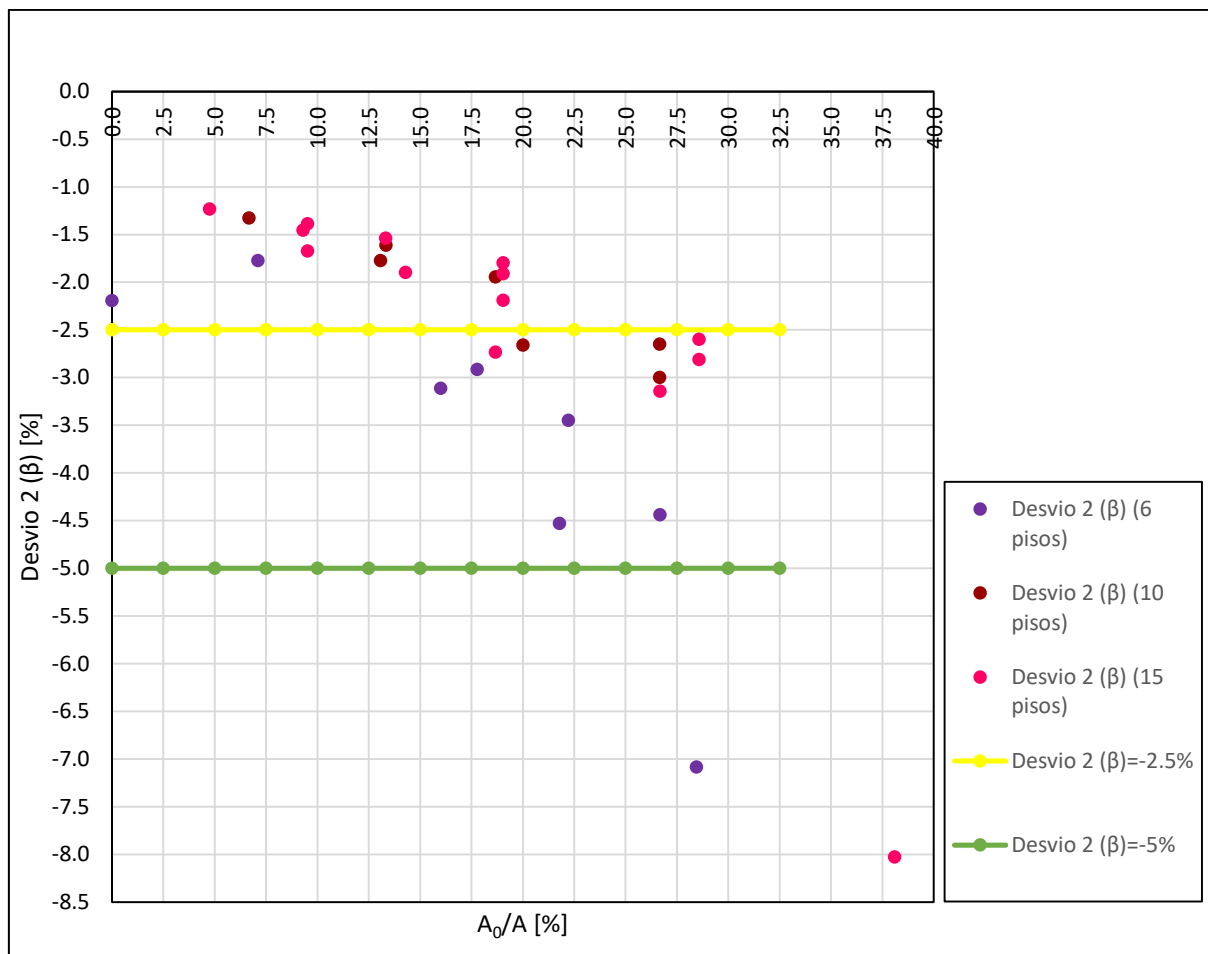


Figura 33 – Desvio 2 (β) para paredes com aberturas de edifícios com 6, 10 e 15 pisos

Os desvios do fator β quando este é calculado com a carga global de encurvadura tendo em conta a flexão e o esforço transverso globais ou pela carga de encurvadura dada pelo *ROBOT* são positivos na sua generalidade, ou seja, pelo lado da segurança (ver Figura 34).

O cálculo da carga global de encurvadura pela equação (2.5) em detrimento da equação (2.3) permite que alguns desvios do fator β se tornem positivos, ou seja, se desloquem para o lado da segurança. Quanto aos restantes desvios do fator de majoração das forças horizontais, apesar de prevalecerem negativos, veem os seus valores absolutos diminuírem (ver Figura 34). Ou seja, para todas as paredes de edifícios de 6 pisos estudadas o desvio 3 do fator β é positivo, enquanto que as paredes de edifícios de 10 ou 15 pisos o desvio 3 do fator de majoração das forças horizontais pode ser positivo ou negativo. Salientando os valores negativos de maior valor absoluto, estes sucedem-se nas paredes de edifícios com 15 pisos.

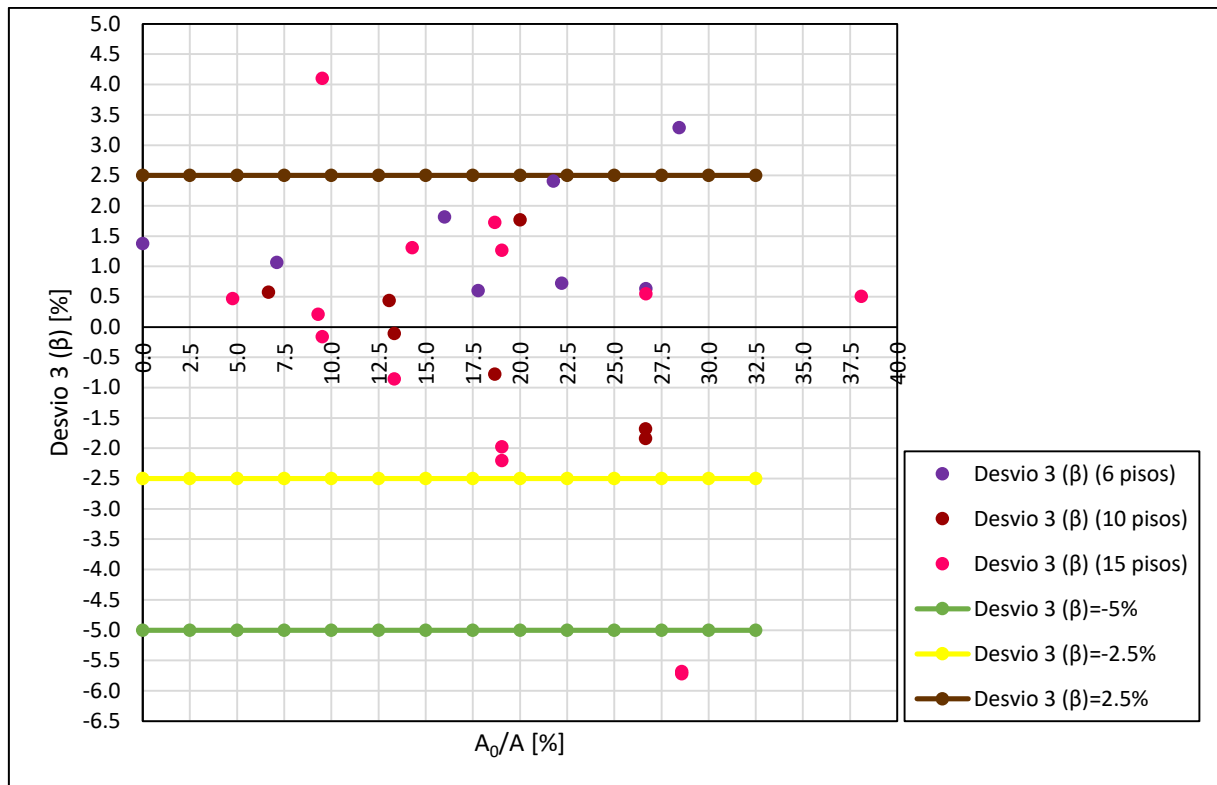


Figura 34 – Desvio 3 (β) para paredes com aberturas de edifícios com 6, 10 e 15 pisos.

5

CONCLUSÕES

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do trabalho descrito nesta dissertação permitiu concluir a partir de que área de uma abertura presente numa parede de contraventamento, será necessária a utilização da equação (H.6) ao invés da equação (H.2), ambas preconizadas no Anexo H do Eurocódigo 2. Para tal, foi feita a determinação dos desvios provocados no fator de majoração das forças horizontais, quando este é calculado a partir dos valores para a carga global de encurvadura dados pelas equações (H.2) e (H.6) presentes no Anexo H do Eurocódigo 2 e pelo programa de cálculo automático, *ROBOT*. O fator de majoração das forças horizontais integrado na equação (H.7) do Anexo H do Eurocódigo 2, pertence a um método de cálculo dos efeitos globais de segunda ordem preconizado no mesmo documento. As equações (H.2) e (H.6), identificadas neste trabalho como (2.3) e (2.5) estão englobadas num método simplificado, baseado no Método da Rigidez Nominal, para o cálculo dos efeitos globais de segunda ordem e assim, obtenção dos esforços de segunda ordem de uma estrutura. A diferença da sua aplicabilidade prende-se na relevância das deformações de esforço transversal dos sistemas de contraventamento. Estes, em edifícios, podem ser constituídos por paredes estruturais de grande rigidez com ou sem aberturas. As dimensões (largura, altura e área) das aberturas das paredes indicarão a importância da sua consideração no cálculo da carga global de encurvadura do edifício.

Os sistemas de contraventamento estudados para edifícios de 6, 10 e 15 pisos são constituídos por paredes de betão de grande rigidez, compostas por um número de painéis correspondentes ao número de pisos, sem aberturas ou com aberturas, portas e ou janelas. Os valores obtidos para a carga global nominal de encurvadura para a flexão global, pela equação (H.2), para a carga global de encurvadura tendo em conta a flexão e o esforço transversal globais, pela equação (H.6) e pelo programa de cálculo automático, *ROBOT* e, para a carga global de encurvadura para o esforço transversal, permitiu o cálculo de três valores para o fator β . A obtenção de três valores distintos para a quantificação do fator de majoração das forças horizontais levou à determinação de três desvios percentuais:

- Desvio 1 (β) entre o valor de β para a carga global nominal de encurvadura para a flexão global pela equação (H.2) e o valor de β para a carga global de encurvadura tendo em conta a flexão e o esforço transversal globais pelo *ROBOT*.
- Desvio 2 (β) entre o valor de β para a carga global nominal de encurvadura para a flexão global pela equação (H.2) e o valor de β para a carga global de encurvadura tendo em conta a flexão e o esforço transversal globais pela equação (H.6).
- Desvio 3 (β) entre o valor de β para a carga global de encurvadura tendo em conta a flexão e o esforço transversal globais pela equação (H.6) e o valor de β para a carga global de encurvadura tendo em conta a flexão e o esforço transversal globais pelo *ROBOT*.

Os desvios obtidos para o fator β de paredes sem aberturas, entre os valores calculados a partir da carga global nominal de encurvadura para a flexão global pela equação (H.2) do Anexo H e a partir da carga global de encurvadura tendo em conta a flexão e o esforço transverso globais pelo programa de cálculo automático apresentam valores quase irrelevantes. Apesar de serem valores negativos, ou seja, uma vez adotada a metodologia do Anexo H, os efeitos globais de segunda ordem serão ligeiramente não conservativos e de pequeno valor absoluto, pelo que poderá dizer-se que a equação (H.2) permite, com muita facilidade o cálculo da carga global de encurvadura de paredes estruturais sem aberturas.

As paredes com aberturas apresentaram comportamentos distintos quando as aberturas introduzidas eram portas ou janelas. A carga global de encurvadura para o esforço transverso é maior nas paredes com portas do que nas com janelas da mesma área, fazendo com que nestas últimas as deformações por esforço transverso sejam mais significativas. O aumento do número de pisos aproxima, cada vez mais, o comportamento das paredes que têm uma porta em cada painel, do comportamento das paredes que têm uma janela da mesma área em cada painel. Ou seja, os desvios do fator β quando estes são determinados a partir da carga global de encurvadura pelas equações do Anexo H e a partir da carga global de encurvadura obtida através do programa de cálculo automático vão-se aproximando à medida que o número de pisos aumenta.

Uma vez adotada a metodologia preconizada no Anexo H do EC2 para cálculo dos efeitos globais de segunda ordem, e estabelecendo um limite de -2.5% para o desvio do fator de majoração das forças horizontais, β , quando este é calculado a partir da carga global nominal de encurvadura para a flexão global e a partir da carga global de encurvadura obtida a partir do ROBOT, deverá ser utilizada a expressão (H.6) em detrimento da (H.2) para aberturas superiores a:

- 20% da área do painel, em edifícios de 6 pisos;
- 17.5% da área do painel, em edifícios de 10 pisos;
- 12,5%, 15% da área do painel, em edifícios de 15 pisos.

A expressão (H.6) apresenta resultados bastante credíveis para todas as paredes estudadas, sendo que os melhores foram obtidos para as paredes de edifícios de 6 pisos. Nestas paredes os desvios obtidos para β foram todos positivos, ou seja, conservativos. Para as paredes de edifícios de 10 e 15 pisos, obtiveram-se valores positivos e negativos, sendo que estes últimos resultaram em maior percentagem nas paredes mais altas. Apesar de se verificarem valores negativos, ou seja, contra a segurança, não implicam a perda de validade da equação, visto que em valor absoluto são valores muito baixos.

Nas paredes de edifícios de 10 e 15 pisos onde foram introduzidas duas aberturas em cada painel, ou seja, quando a área de abertura não está concentrada, mas sim distribuída, as expressões para o cálculo da carga global de encurvadura do Anexo H do EC2 produzem resultados ainda mais razoáveis e mais conservativos, podendo ser dispensada a utilização da expressão (H.6) até aberturas de área superior às indicadas anteriormente.

A metodologia presente no Anexo H do EC2 para o cálculo dos efeitos globais de segunda ordem apresenta uma abordagem mais geral para estruturas em que o momento fletor nos elementos de contraventamento não é o principal efeito das ações, baseada no Método da Rigidez Nominal. Nesta metodologia são tidas em conta as deformações globais de flexão e por esforço e transverso. Posto isto, e de acordo com o estudo realizado, poderá dizer-se que é um procedimento simplificado com resultados muito razoáveis para ser adotado na obtenção dos esforços de segunda ordem, neste tipo de estruturas, em substituição da realização de uma análise não linear, que se caracteriza pela sua grande complexidade e morosidade.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O trabalho efetuado, descrito neste documento poderá ser aperfeiçoado, de modo a que conclusões abranjam o maior número de casos possível:

- Adotando no cálculo da carga global nominal de encurvadura para a flexão global pela equação (H.2) do Anexo H do Eurocódigo 2, o valor 0.3 em substituição de 0.4, uma vez que 0.3 é o valor utilizado nos regulamentos americano e australiano para a consideração da fendilhação no betão;
- Repetindo o estudo para paredes de edifícios com outros números de pisos;
- Estudando para diferentes edifícios com diferentes números de pisos qual o valor de rigidez nominal mais adequado a utilizar no cálculo das cargas globais de encurvadura dos diferentes tipos de paredes, verificando se o fator 0.4 será o mais apropriado e se é consensual em todos os tipos de estruturas;
- Aplicando a metodologia do Anexo H do Eurocódigo 2 a sistemas porticados e, posteriormente, avaliando os resultados obtidos de forma a validar, ou não, a sua utilização nesse tipo de estruturas.

BIBLIOGRAFIA

1. EN, N., *1-1 (2010) Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*. Instituto Português da Qualidade, 1992.
2. Teixeira, A.M.d.C., *Análise dos efeitos de segunda ordem de estruturas de edifícios de betão armado: avaliação da aplicação em projecto das metodologias preconizadas no EC2*. 2012.
3. Westerberg, B., *Second order effects in slender concrete structures*. 2004(Background to the rules in EC2).
4. Mohammed, B.S., L. Ean, and M. Malek, *One way RC wall panels with openings strengthened with CFRP*. Construction and Building Materials, 2013. **40**: p. 575-583.
5. Doh, J.-H. and S. Fragomeni, *Ultimate load formula for reinforced concrete wall panels with openings*. Advances in Structural Engineering, 2006. **9**(1): p. 103-115.
6. Guan, H., C. Cooper, and D.-J. Lee, *Ultimate strength analysis of normal and high strength concrete wall panels with varying opening configurations*. Engineering Structures, 2010. **32**(5): p. 1341-1355.

